

DIMENSIONADO DE DEPÓSITOS DOMÉSTICOS DE AGUAS PLUVIALES UTILIZANDO SERIES TEMPORALES DE DATOS

• Gonzalo López-Patiño • F. Javier Martínez-Solano •
• Vicente S. Fuertes-Miquel • P. Amparo López-Jiménez •
Universidad Politécnica de Valencia, España

Resumen

Los sistemas domésticos de aprovechamiento de lluvia se están recuperando como una opción alternativa al suministro desde las redes generales de distribución de agua potable para usos no higiénico-sanitarios. Este auge no ha ido acompañado de rigurosos criterios técnicos para el dimensionado de los elementos que forman el sistema. El objetivo de este trabajo es presentar una serie de metodologías para el dimensionado de depósitos de lluvia basadas en criterios funcionales y/o económicos. El resultado será una serie de expresiones que permiten calcular el volumen necesario del depósito. A la vista de los resultados se podrá comprobar que las dimensiones obtenidas al aplicar criterios funcionales son bien distintas de las que resultan de la aplicación de los criterios económicos, y la decisión final sobre la elección de uno u otro criterio estará condicionada por las características de la edificación.

Palabras clave: reutilización de agua de lluvia, aprovechamiento de lluvia, ahorro de agua, depósito, hidroeficiencia.

Introducción

El agua de lluvia es la fuente principal de todos nuestros suministros de agua por cuanto abastece a embalses, ríos y acuíferos (Legget *et al.*, 2001). Los sistemas domésticos de aprovechamiento de pluviales recogen el agua caída dentro de los límites de una determinada edificación para beneficiarse de la localización de la oferta y demanda del recurso agua.

En determinados entornos, donde hay ausencia de infraestructura de distribución de agua, los sistemas domésticos de aprovechamiento de agua se convierten en una de las pocas alternativas para disponer de este recurso.

Por otro lado, en zonas donde sí se dispone de redes de distribución de agua potable, los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia resultan una opción para la mejora de la gestión mediante la optimización de los recursos,

entendiendo en ello que no sólo se optimiza el recurso agua, sino los recursos económicos puestos en juego para la implantación del sistema.

En España existe un importante déficit hídrico que se complementa con la aparición de sequías cada vez con mayor frecuencia. Así, Álvarez *et al.* (2008) realizan un repaso de la pluviometría y las sequías en España y se pueden destacar algunos datos. Por ejemplo, en toda España, entre 1940 y 1980 se registraron un total de seis sequías hidrológicas de carácter leve, considerando éstas las que tienen periodos de retorno comprendidos entre 50 y 200 años. Entre 1980 y 2007 se han registrado nueve sequías, dos de ellas de carácter severo, con periodos de retorno superiores a 200 años. Se apunta al cambio climático como posible causa, aunque no es la única. En la zona mediterránea, estas estadísticas son aún más significativas. En el periodo 1940-1980 se registraron dos

sequías leves y una severa, mientras que en el periodo posterior, 1980-2007, se registraron nueve sequías leves y dos severas. En España, el problema de la escasez de recursos hídricos es motivo de debate político y una continua búsqueda de soluciones. Estas soluciones han ido por el lado del aumento de la oferta (BOE, 2007), pero también por el planteamiento de una estrategia de optimización de la demanda (MIMAM, 2007).

Dentro de la estrategia de eficiencia en la demanda existe la posibilidad de sustituir parte de la demanda de agua que se consume de las redes de distribución de agua potable, por agua procedente de la lluvia y recogida *in situ*, sin un tratamiento de potabilización, para usos en los que la calidad higiénica-sanitaria no sea tan alta.

Sin embargo, se da la circunstancia de que en la franja mediterránea española la pluviometría es escasa (entre 400 y 700 mm/año) y altamente irregular, entre 40 y 50 días de lluvia al año, según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet, 2008). Esta alta variabilidad en la pluviometría supone un problema para el dimensionado y selección de los equipos.

De todos los elementos que forman el sistema de aprovechamiento de aguas pluviales, el más importante resulta ser el depósito de almacenamiento. Los elevados volúmenes de lluvia que se recogen en poco tiempo sobredimensionan el tamaño del depósito, perdiendo en algunos casos la búsqueda optimización de las inversiones económicas a realizar.

Existen numerosas realizaciones documentadas de la implantación de sistemas de este tipo. Thomas (1998) menciona soluciones en áreas rurales con características climáticas muy diferentes en China, Singapur y África Oriental. Herrmann y Schmida (1999) hacen una evaluación de los aspectos hidráulicos y ambientales de la implantación en Alemania. Villareal y Dixon (2005) incorporan una estimación económica de la implantación de estas soluciones en Suecia. Ghisi (2006)

hace un estudio de la disponibilidad de agua utilizando estos sistemas en el sur de Brasil. Sazakli *et al.* (2007) revisan experiencias más actuales en Grecia. En ninguno de estos casos se documenta el procedimiento seguido para la determinación del volumen del depósito.

Los criterios para la determinación del volumen del depósito son muy dispares. Fewkes (1999a) establece un método que tiene en cuenta la fracción de la demanda total que se quiere abastecer con el sistema de aprovechamiento de lluvia, lo que Dixon *et al.* (1999) denominan eficiencia del sistema, y una relación entre el tamaño del depósito y la lluvia anual recogida por el sistema. Los resultados son obtenidos mediante la simulación del comportamiento del sistema de aprovechamiento de las pluviales. Fewkes considera que el sistema de aprovechamiento de lluvia es usado para abastecer los inodoros del edificio en cuestión y supone que el patrón de demanda de éstos durante todo el año es constante. El método de Fewkes considera que las precipitaciones se producen de forma más o menos uniforme a lo largo de todo el año. En un clima mediterráneo hay una importante estacionalidad en la lluvia, lo cual provoca que en los meses de verano se produzca un estiaje que impide el aprovechamiento de las mismas aportaciones que en el periodo primaveral.

Remosa (2007), fabricante de sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales, establece una fórmula de cálculo que tiene en cuenta la superficie de captación y el tiempo de retención de agua en el depósito. Establece un valor fijo de la demanda y no tiene en cuenta el valor de la precipitación. Es un criterio absolutamente carente de rigor.

La norma alemana DIN 1989-1 (DIN, 2002) considera que las dimensiones del depósito son el menor valor entre la demanda abastecida desde el mismo o la lluvia recogida, multiplicado por un factor que resulta ser el número de días promedio entre dos precipitaciones consecutivas, que

está fijado en la norma. Este método tiene el problema que no considera la casuística de las zonas mediterráneas, donde el régimen pluviométrico es muy distinto al alemán.

El principal objetivo de este artículo es presentar una serie de metodologías para determinar el volumen necesario de depósito a partir de series temporales de datos pluviométricos y la demanda de agua.

Se presentan dos aproximaciones para el dimensionado: una funcional, en la que se busca el máximo aprovechamiento de los recursos naturales, aunque no resulte económicamente rentable su aprovechamiento. La otra aproximación, económica, tiene en cuenta la rentabilidad global del sistema, introduciendo los costes de inversión como variable.

Asimismo, se intenta aprovechar la precisión y extensión de las series temporales con las que se cuenta para conseguir un dimensionado más preciso del depósito. Para los datos pluviométricos, Fewkes (1999b) establece una recomendación de cadencia de los datos, según sea el factor de almacenamiento del sistema de aprovechamiento de pluviales (en adelante SAP).

Con respecto a la demanda, es fundamental conocer el consumo de los usos que se pretenden sustituir con el agua de lluvia aprovechada (riegos, descarga de inodoros, lavadoras, baldeos, etcétera). En tanto que los consumos no se producen de forma uniforme, será necesario disponer de su variación temporal, ya sea diaria, semanal, mensual o estacional, correspondiendo con la cadencia de los datos pluviométricos.

La importancia de un cálculo adecuado del volumen del depósito radica en el hecho de que es el elemento fundamental del sistema, y uno de los que mayor coste suponen para la instalación. Este coste es el propio del equipo instalado y también el costo de oportunidad del espacio que ocupa, que no puede ser destinado a otros usos del edificio de mayor valor añadido (local comercial, garaje, etcétera).

Los métodos propuestos se aplicarán a un caso real bien documentado, para compararlos y extraer conclusiones de sus resultados.

Descripción del sistema

Un sistema de aprovechamiento de aguas pluviales consiste en un depósito que recoge el agua de lluvia caída sobre la cubierta de un edificio y la almacena para su posterior uso en cisternas de inodoros o riego de jardines. En función de las características hidráulicas del sistema, Herrmann y Schmida (1999) establecen una clasificación en cuatro tipologías:

- Sistemas de flujo total, en los que toda la escorrentía es conducida al depósito.
- Sistemas con división del flujo, en los que sólo se aprovecha una parte de la lluvia caída, enviándose el resto al alcantarillado.
- Depósitos de retención, en los que la finalidad es principalmente la de laminar los picos de intensidad de lluvia.
- Depósitos de infiltración, cuya única diferencia con los sistemas con división de flujo consiste en que el exceso de agua se envía a suelo permeable para su infiltración, en lugar de al alcantarillado.

De todos estos sistemas, el que se ha estudiado en este trabajo es el sistema de flujo total, cuyo esquema se puede ver en la figura 1.

El funcionamiento de este sistema es similar al descrito por otros autores, entre ellos Fewkes (1999b) en Inglaterra; Herrmann y Schmida (1999) en Alemania; Villareal y Dixon (2005) en Suecia, y Ghisi (2006) en Brasil. El sistema recoge la escorrentía producida por la lluvia caída sobre la cubierta (P) y la conduce al depósito donde la almacena (V). La demanda de agua correspondiente al uso en inodoros (D) se abastece de agua procedente del depósito (Q) y si ésta no es suficiente, se completa con agua potable procedente de la red (R). Por otra parte, si la lluvia supera la



Dimensionado funcional

Existen dos modos de dimensionado funcional del sistema: dimensionado condicionado por la demanda y dimensionado condicionado por la aportación.

El sistema se dimensiona para satisfacer la demanda exclusivamente con el agua de lluvia aportada, sin recurrir a agua potable procedente de la red. Dicho de otra forma, se calcula el depósito de esta forma si toda la demanda puede ser atendida con los volúmenes de agua recogidos. Para conseguirlo, la precipitación total recogida durante un periodo T (P_T) debe superar a la demanda correspondiente a ese mismo periodo (D_T):

Esta condición se puede cumplir, bien porque la aportación es elevada gracias a un régimen de lluvias abundante, bien porque los consumos son muy bajos, como consecuencia de una demanda escasa o localizada en ciertos periodos del año (caso de las residencias vacacionales).

La máxima precisión para el dimensionado que permiten los históricos de información pluviométrica será para unas demandas y aportaciones diarias. De este modo, el volumen del depósito de lluvia se corresponderá con el de un depósito de regulación mensual que realice el balance entre las aportaciones (provenientes del agua de lluvia) y las demandas. Los detalles del cálculo del depósito se pueden encontrar en Fuertes-Miquel y López-Patiño (2002).

En el caso de España, con un clima mediterráneo con precipitaciones escasas (670 mm anuales) y superficies de captación tan pequeñas como las correspondientes a edificaciones, esta aproximación no resulta la más adecuada.

Cuando la aportación total anual es inferior a la demanda, sólo una fracción del consumo puede ser abastecido con el SAP.

Para este modo de dimensionamiento, Dixon *et al.* (1999) definen el concepto de eficiencia del sistema en un periodo T (E_T) como la relación entre la demanda satisfecha

desde el depósito de pluviales (Q_T), frente a la demanda total de agua de los aparatos suministrados desde el SAP (D_T):

$$E_T = \frac{Q_T}{D_T} \quad (2)$$

Esta eficiencia es tanto mayor cuanto mayor es la capacidad del depósito de almacenamiento. Una eficiencia mayor o igual al 100% implica un modo de dimensionado condicionado por la demanda y se realiza como se ha indicado anteriormente. Al ser la aportación inferior a la demanda, existe un máximo teórico que corresponde a aprovechar toda la lluvia caída y suplir el déficit de consumo con agua potable procedente de la red. La eficiencia máxima viene dada por el cociente entre la precipitación y la demanda:

$$E_{\text{máx}} = \frac{P_T}{D_T} \quad (3)$$

Una eficiencia máxima es equivalente a considerar que el depósito de almacenamiento tiene una capacidad lo suficientemente grande como para no desaprovechar por desbordamiento ninguna cantidad de lluvia. Por tanto, el dimensionado funcional de los depósitos perseguirá alcanzar esta eficiencia máxima, es decir, no desperdiciar ni una gota de agua de lluvia. A continuación se describe el proceso de cálculo.

En el caso más general, la demanda experimenta una variación temporal. Ésta puede ir simplemente desde un consumo continuo, pero variable de un día a otro (régimen de consumo en días laborables y festivos, por ejemplo), hasta una variación estacional (por ocupación de la edificación sólo durante los periodos vacacionales, como puede ser el caso de muchas segundas residencias).

Hay periodos en los que la aportación es mayor que la demanda, con un balance positivo en el volumen almacenado en el depósito de recogida de lluvia. Por el contrario, en otros periodos el balance es negativo, como consecuencia de que la demanda es mayor que la aportación.

La capacidad del depósito debe ser tal que permita almacenar el agua en los periodos en los que el balance es positivo. Este volumen será extraído del depósito en los periodos con balance negativo. La diferencia que existe debido al hecho de que las aportaciones son inferiores a la demanda se compensa con agua potable procedente de la red.

Las dimensiones del depósito se corresponden con las de un volumen de regulación para un determinado periodo de referencia T , generalmente un año. La demanda satisfecha desde el depósito al finalizar dicho periodo viene dada por la propia lluvia, aunque su reparto no tiene por qué coincidir.

Para cada intervalo de cálculo Δt se realiza un balance entre el volumen entrante en ese instante, P_t , y el saliente, Q_t . El volumen almacenado en el depósito en un instante t , V_t , es el volumen en el instante anterior más la aportación instantánea menos la demanda instantánea:

$$V_t = V_{t-1} + (P_t - Q_t) \quad (4)$$

El volumen del depósito V_D es la diferencia entre los volúmenes máximo y mínimo acumulados en el depósito a lo largo de todo el periodo:

$$V_D = \text{máx}(V_t) - \text{mín}(V_t) \quad (5)$$

El volumen calculado de esta forma se convierte en un valor máximo del depósito de almacenamiento del SAP. Un valor superior a éste implica que existe una fracción del agua acumulada en su interior que no se llega a utilizar, pues no es necesaria para la regulación anual del sistema. Este valor se puede considerar por tanto como un volumen máximo hidráulico.

Dimensionado económico del depósito

Esta aproximación al problema del dimensionado tiene en cuenta el coste económico

asociado con la inversión y el ahorro obtenido al dejar de consumir agua potable de la red. Desde el punto de vista del coste, un depósito cuyas dimensiones son superiores al volumen máximo hidráulico calculado anteriormente tiene un mayor coste de inversión, pero no proporciona mayores ahorros de agua consumida de la red y, por ende, no existe un ahorro económico en el precio que se paga por ella. Esto significa que se reduce la rentabilidad de la inversión.

Si se analiza la eficiencia del SAP frente al volumen del depósito de almacenamiento, se puede observar que crece con el volumen, acercándose asintóticamente a su valor máximo, tal y como muestra la figura 2.

Esto justifica que exista el volumen hidráulico máximo de depósito que se ha comentado anteriormente, como el valor que hace que no desborde ninguna proporción de la lluvia aportada al depósito como consecuencia de una falta de capacidad de regulación.

La demanda total, D_T , es independiente del SAP, puesto que si no es atendida por éste debe ser suministrada desde la red general. En términos estrictamente económicos, la eficiencia del SAP se traduce en un ahorro de agua potable procedente de la red general de distribución. Esto, a su vez, implica un ahorro económico ΔC_w , que se puede evaluar como:

$$\Delta C_w = p_w \cdot Q_T = p_w \cdot D_T \cdot E_T \quad (6)$$

En esta ecuación, p_w es el precio del m^3 de agua potable (incluidos todos los conceptos tanto de abastecimiento como de saneamiento y vertido). En este sentido, si la tarifa es progresiva con el consumo, se tomará el precio del estrato de tarifa que se alcanzaría con el consumo de agua de la red si no estuviera instalado el SAP. Mientras que D_T y E_T son la demanda y la eficiencia en el periodo T de referencia (normalmente un año). Puesto que la eficiencia tiende a un máximo en función

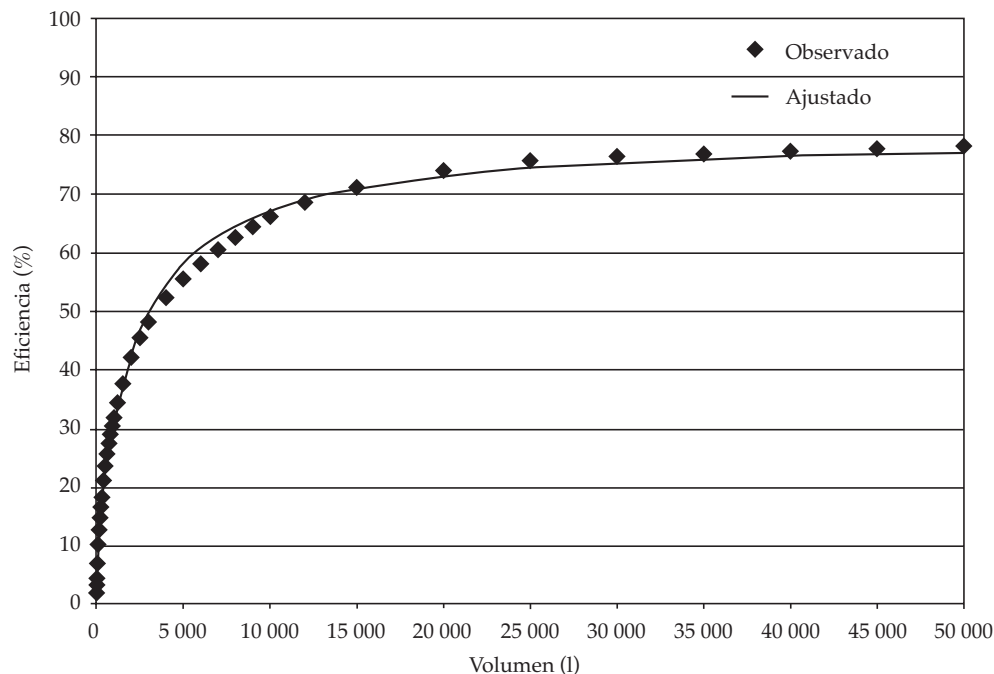


Figura 2. Evolución de la eficiencia del SAP con el volumen del depósito de acumulación.

del volumen del depósito, la ecuación (6) se puede escribir como:

$$\Delta C_w = p_w \cdot D_T \cdot E_{\max} \cdot f(\forall_D) = \Delta C_{\max} \cdot f(\forall_D) \quad (7)$$

Para la función $f(\forall_D)$ se han probado varias expresiones, entre ellas la exponencial (López-Patiño et al., 2008) y la potencial. Sin embargo, la expresión que mejor ajuste presenta es una expresión del tipo:

$$E_T = E_{\max} \cdot f(\forall_D) = E_{\max} \left(1 - \frac{A}{B + \forall_D} \right) \quad (8)$$

El ahorro económico se podrá expresar como:

$$\begin{aligned} \Delta C_w &= p_w \cdot D_T \cdot E_T = p_w \cdot D_T \cdot E_{\max} \left(1 - \frac{A}{B + \forall_D} \right) \\ &= \Delta C_{\max} \left(1 - \frac{A}{B + \forall_D} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Por otra parte, hay que tener en cuenta los costos de inversión del depósito.

El depósito puede estar instalado de forma aérea o enterrada. Tanto en un caso como en otro, son varios los factores que pueden intervenir en el coste final del depósito instalado: valor del suelo sobre el que se implanta el depósito, coste de la excavación en terreno blando o en terreno rocoso, costo de relleno, etcétera. Para no entrar a este nivel de detalle, se va considerar exclusivamente el coste de inversión de depósito propiamente dicho. Este coste se puede ajustar a una función lineal con unos costes fijos, C_0 y unos costes unitarios crecientes con el tamaño del depósito, m :

$$C_D = C_0 + m \cdot \forall_D \quad (10)$$

En la figura 3 se muestra el ajuste de los precios comerciales de un fabricante (Remosa, 2007) a esta función, observándose que el comportamiento es bastante ajustado.

Como en cualquier problema de dimensionado económico, es necesario uniformizar los periodos en el estudio coste-beneficio. Los costes de explotación se producen cada año, mientras que los costes de inversión se prolongan por toda la vida útil del equipo. Para ello se van a reducir las cantidades a su valor neto a tiempo presente. Así, los costes de inversión se deben revisar para tener en cuenta el efecto de la amortización del equipo, de manera que si se reduce el coste a una escala anual, para una tasa de interés real r y un periodo de amortización de N años, quedaría un coeficiente de amortización a :

$$a = \frac{(1+r)^N \cdot r}{(1+r)^N - 1} \quad (11)$$

Por tanto, los costes anuales de amortización vienen dados por la siguiente expresión:

$$C'_D = a \cdot C_D = a \cdot (C_0 + m \cdot \forall_D) = C'_0 + m' \cdot \forall_D \quad (12)$$

A la vista de los gráficos de eficiencia y coste de inversión con el tamaño del depósito, se puede establecer que volúmenes menores al máximo hidráulico pueden reducir el coste del depósito, sin que ello afecte de forma significativa a la eficiencia. Así, se puede establecer que existe un volumen que optimiza la rentabilidad económica de la inversión, $\forall_{opt}$. Sin embargo, en función de los valores que

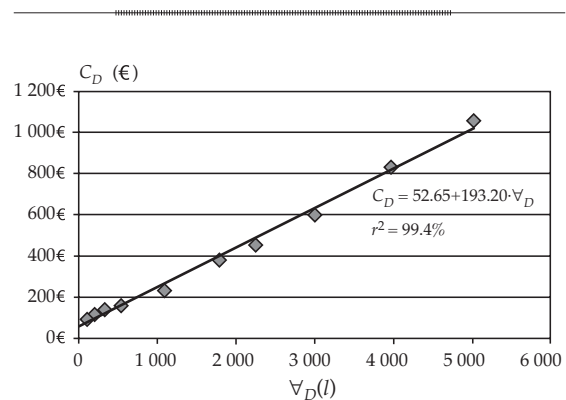


Figura 3. Coste de inversión de depósitos de recogida de pluviales en PRFV (Remosa, 2007).

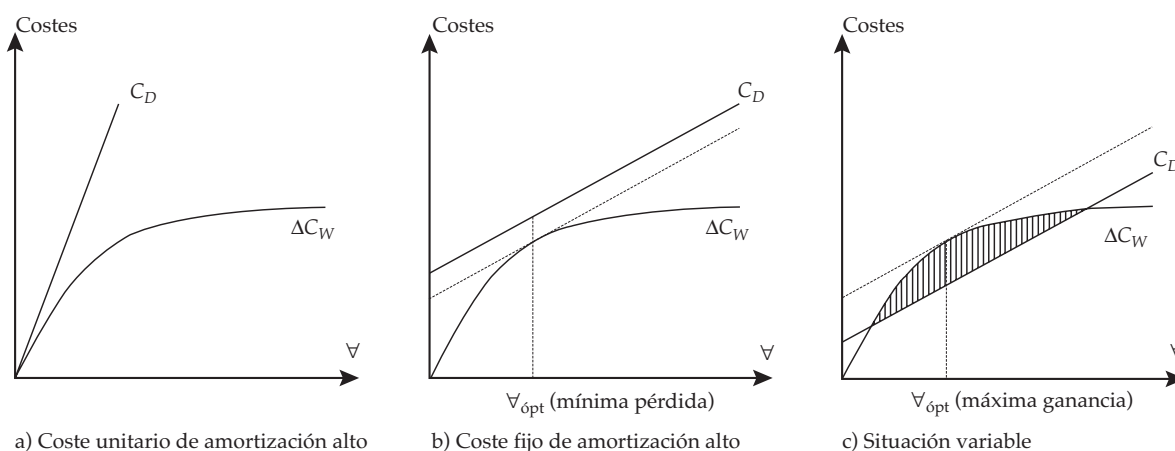


Figura 4. Rentabilidad económica de la instalación del depósito de pluviales.

adopten las expresiones del ahorro económico y del coste de inversión, se pueden dar varias situaciones distintas, mostradas en la figura 4.

Si los costes de amortización de la inversión son siempre mayores que el ahorro económico, independientemente del tamaño del depósito, entonces el SAP no será rentable en ningún caso. Esto se puede deber a dos motivos: que el coste unitario de la amortización sea siempre mayor que el ahorro económico (figura 4a), en cuyo caso el volumen óptimo es nulo; o que los costes fijos del SAP sean excesivos (figura 4b), existiendo un volumen óptimo que minimiza las pérdidas derivadas de la inversión. En cualquiera de estos casos, la implantación del SAP obedece a intereses medioambientales o conservacionistas, pero no a un criterio de rentabilidad económica.

Por el contrario, si la función costo de inversión está parcialmente por debajo de la función ahorro (hay que tener en cuenta que, al ser asintótica la expresión de la eficiencia, el costo de inversión siempre será mayor que el ahorro para los grandes volúmenes de depósito), entonces es posible encontrar un volumen de depósito que maximiza la rentabilidad económica, como se observa en la figura 4c. El volumen de depósito que maximiza la rentabilidad económica es el que mayor beneficio reporta, entendiendo éste

como la diferencia entre el ahorro económico y el coste amortizado del depósito.

A continuación se describe el proceso de cálculo del volumen óptimo, en el supuesto de que éste exista. El mayor beneficio se logra cuando la diferencia entre el ahorro y la inversión es máxima. Dicho de otra forma, cuando la variación del ahorro con el volumen del depósito (ahorro unitario) es igual al coste de unitario de amortización, m' .

La variación del ahorro frente al volumen es la pendiente de la función presentada en la ecuación (9):

$$\frac{d}{dV} \Delta C_w = \Delta C_{\text{máx}} \frac{A}{(B + V_D)^2} \quad (13)$$

Por su parte, la pendiente del coste de amortización es constante y viene dada por:

$$\frac{dC'_D}{dV} = m' \quad (14)$$

Igualando ambas expresiones se obtiene finalmente el valor del volumen óptimo de depósito que hace más rentable la instalación:

$$V_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{\Delta C_{\text{máx}} \cdot A}{m'}} - B \quad (15)$$

El volumen más rentable del depósito, V_{opt} es siempre menor que el volumen máximo hidráulico. Sin embargo, como ya se ha comentado, puede resultar de un valor inusualmente bajo, incluso negativo, lo cual no justificaría la instalación del SAP.

Aplicación

Como ejemplo de aplicación de la metodología propuesta, a continuación se presenta un caso para su estudio. La instalación objeto de estudio es en una vivienda unifamiliar situada en Castellón, España, con una superficie de cubierta de 100 m². Para esta población se dispone de una serie temporal de datos de precipitación que abarca datos de lluvia recogidos a intervalos de una hora, desde septiembre de 1980 hasta octubre de 2000, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología de España. En ese periodo, la precipitación media recogida fue de 442 mm/año.

Para el estudio se hizo una estimación de consumo de agua para WC de acuerdo con los datos presentados por Friedler *et al.* (1996), según los cuales el número medio de usos de una cisterna es de 4.13 usos por habitante y día. Para una ocupación media de la vivienda de cuatro personas y una cisterna estándar de nueve litros, el consumo de agua en el WC será de 148.68 l/día, es decir, 54.27 m³/año. La tarifa que tiene el agua potable en esta población es de 1.36 €/m³, según datos publicados en el Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2008).

Diseño funcional del SAP

En primer lugar, aprovechando la disponibilidad de datos, se realizará un diseño funcional del SAP. Para ello, se recurrirá a la serie temporal de precipitaciones y a los consumos, admitiendo un patrón diario de consumos como el de la figura 5, correspondiente a un consumo doméstico

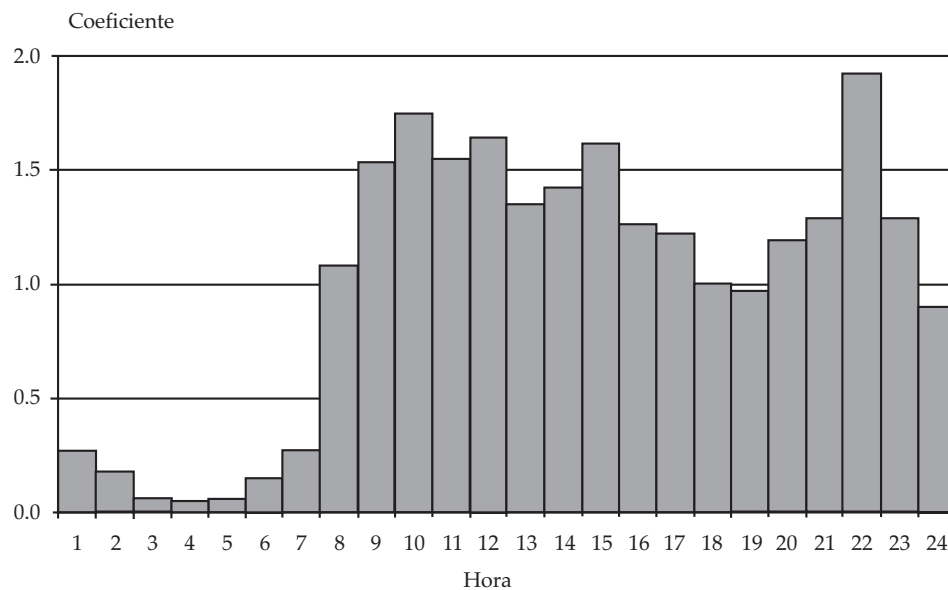


Figura 5. Patrón de consumos domésticos.

normal medido en una vivienda de características similares (Fuertes-Miquel y Martínez-Solano, 2002).

De esta forma se ha obtenido el volumen máximo hidráulico utilizando las ecuaciones (4) y (5), tal y como se ha descrito anteriormente. Este volumen máximo hidráulico resulta ser de 121 m³ y supone una eficiencia de aprovechamiento de la instalación del 81.44%, que coincidirá con la $E_{\text{máx}}$.

Evolución de la eficiencia en función del volumen del depósito

Utilizando los datos de la serie temporal antes mencionados y el patrón de consumos, se han realizado simulaciones con distintos volúmenes de depósito entre 0 y el volumen máximo hidráulico calculado en el paso previo. Los cálculos se basan en un balance simple de volúmenes entre dos instantes consecutivos. Existen dos alternativas para este balance: desbordar antes de suministrar y su opuesto, suministrar antes de desbordar (Jenkins et al., 1978). El primer algoritmo es el utilizado por Dixon et al. (1999) para simulaciones con intervalo de tiempo de una hora, que es el caso que se desarrolla. Fewkes (1999b) lo recomienda para intervalos de cálculo cortos, en el entorno de un día o inferiores, utilizando para intervalos mayores un coeficiente θ , con valores entre 0 y 1, que será tanto mayor cuanto mayor sea el intervalo de cálculo. Para estos casos, este autor no observa diferencias entre los resultados obtenidos mediante ambos algoritmos.

Siguiendo cualquiera de los dos algoritmos mencionados, para cada intervalo de cálculo se ha determinado el volumen según un balance de volúmenes:

$$\forall_t = \forall_{t-1} + (P_t - D_t) \quad (16)$$

En esta expresión, siguiendo la notación expuesta en la figura 1, P es la entrada de agua de lluvia, D es la demanda de agua en la vivienda y Q es la demanda satisfecha desde

el SAP. El subíndice t se refiere al instante de cálculo actual y $\forall$ es el volumen de agua acumulada en el depósito. Este volumen es provisional, puesto que se debe tener en cuenta la posibilidad de desbordamiento o de falta de agua. En efecto, si el volumen antes calculado excede la capacidad del depósito, $\forall_D$, se produce un desbordamiento de agua hacia la red de alcantarillado O_t :

$$\begin{aligned} \forall_t &= \forall_D \\ O_t &= \forall_{t-1} + (P_t - D_t) - \forall_D \end{aligned} \quad (17)$$

Por el contrario, si el volumen acumulado resulta negativo, debe interpretarse como un déficit que deberá ser compensado mediante un aporte de agua procedente de la red de agua potable. Por tanto, el volumen que queda después de cada intervalo de cálculo viene dado por una expresión algo más compleja:

$$\begin{aligned} \forall_t &= 0 \\ Q_t &= \forall_{t-1} + P_t \\ R_t &= D_t - Q_t \end{aligned} \quad (18)$$

Tras realizar las simulaciones, se obtiene como resultado una relación entre la eficiencia y el volumen del depósito. La gráfica obtenida se ajusta aceptablemente a la expresión siguiente:

$$E = E_{\text{máx}} \left(1 - \frac{A}{B + \forall_D} \right) = 0.8144 \cdot \left(1 - \frac{1.5569}{1.6948 + \forall_D} \right) \quad (19)$$

En esta ecuación, $\forall_D$ viene expresado en m³.

El resultado se muestra en la figura 2, junto con la línea correspondiente al ajuste de la ecuación (19).

Dimensionado económico del depósito

Para el dimensionado del depósito se adoptan los costes del depósito y la tarifa del agua potable mencionados anteriormente. Para el

balance económico se asume una vida útil del depósito de 15 años y una tasa de interés real del 2%, lo cual conduce a un coeficiente de amortización del 7.78%.

El ahorro máximo al que se puede aspirar es, según la ecuación (9):

$$\Delta C_{\text{máx}} = p_W \cdot D_T \cdot E_{\text{máx}} = 1.36 \cdot 54.27 \cdot 0.8144 = 60.11 \text{€} \quad (20)$$

Por su parte, el coste de amortización del equipo viene dado por:

$$C'_D = a \cdot C_D = 0.0778 \cdot (52.65 + 193.20 \cdot V_D) = 4.15 + 15.03 \cdot V_D \quad (21)$$

Por tanto, según la ecuación (15) antes presentada, el volumen de depósito óptimo desde un punto de vista económico será de 0.8 m³, es decir, 800 litros. Este volumen supone una eficiencia global del sistema del 30.6%.

Discusión de los resultados

Los resultados anteriores admiten algunos comentarios que deben hacerse. El volumen del depósito calculado mediante el método funcional proporciona un valor anormalmente alto. Analizando las causas por las que resulta dicho valor, se observa que en la serie de datos temporales utilizados se registró un evento de precipitación increíblemente alto en el año 1994, con un periodo de retorno superior a cien años.

Tal cantidad de lluvia, siguiendo un criterio en el que se aprovecha toda la aportación, es el que lleva a un sobredimensionado del depósito de tal magnitud.

Considerando en el cálculo un valor promedio de las precipitaciones registradas en el mismo periodo que la serie temporal de datos utilizada, el volumen del depósito resultaría ser de 22.4 m³, notablemente inferior al resultado anterior.

Otros métodos de dimensionado producen valores sensiblemente más pequeños. Utilizando el método de Fewkes (1999a), el volumen del depósito resulta ser de 11 m³. Este valor resulta ser inferior al calculado mediante el método propuesto en esta contribución, porque Fewkes no considera la estacionalidad en las aportaciones de lluvia. En un clima con meses secos y otros extremadamente lluviosos, como es el clima mediterráneo en que se ha particularizado el caso de estudio, el depósito tiende a estar sobredimensionado para almacenar el exceso de lluvia que es usada en los meses de estío.

El método indicado de la norma DIN 1989-1 (DIN, 2002) presenta un valor del depósito de 2.65 m³, condicionado por la oferta de agua. Igualmente, este método considera una aportación regular durante todo el año. Si se toman los valores de aportación anual relativamente bajos (425 mm/año) de la zona de Castellón y, además, se reparten uniformemente durante todo el año, es claro que el depósito necesario para aprovechar la aportación es muy pequeño. Evidentemente, esta aproximación dista de ser cierta en un clima mediterráneo como el que se está considerando.

Por su parte, el método de Remosa, tomando como periodo de permanencia del agua en el depósito el mismo de la norma DIN 1989-1, 22 días, muestra un resultado de 13.2 m³. Este volumen puede fluctuar tanto como se desee. No hay más que considerar otro tiempo de permanencia para que el resultado cambie notablemente. El tiempo de permanencia lo fija el proyectista, sin que exista un criterio para ello. No es un método suficientemente riguroso como para que ser tenido en cuenta para comparación alguna.

A la vista de los resultados del método funcional y el método económico, se observa una gran diferencia entre el volumen máximo hidráulico (121 m³) y el volumen óptimo (0.8 m³). Aun eliminando la influencia de la anormal precipitación registrada, se observa una gran diferencia entre ambos

métodos (22 m³ para el funcional, 0.8 m³ para el económico). Esto se debe a que, con el método funcional, se dimensiona para no desaprovechar nada de la lluvia caída. El depósito así calculado tiene capacidad de regulación estacional, almacenando agua en la estación más lluviosa para aprovecharlo en la estación más seca, e incluso puede tener un comportamiento hiperanual. El elevado tiempo de permanencia del agua almacenada hace que ésta experimente una pérdida considerable de calidad y puede convertir la solución calculada mediante el método funcional en inviable para determinados usos, por ejemplo, la descarga de inodoros.

Conclusiones

La utilización de agua de lluvia en sustitución del agua potable para determinados usos (descarga de inodoros, riego o lavadoras) puede ser tenida en cuenta como alternativa para la mejora de la eficiencia del uso de recursos hídricos. La infraestructura necesaria para ello se basa principalmente en un depósito con capacidad de almacenamiento, de cuyo tamaño depende una parte importante de la inversión que se debe realizar.

El dimensionado de depósitos de aprovechamiento de lluvia se puede realizar atendiendo a criterios funcionales o a criterios económicos. El dimensionado funcional se aconseja cuando se quieren aprovechar al máximo los recursos naturales disponibles. Con este dimensionado se obtienen importantes volúmenes que sólo se justifican por criterios conservacionistas. No obstante, tiene desventajas por cuanto los periodos de permanencia del agua almacenada pueden invalidar los usos que exijan mayor calidad.

Por su parte, el dimensionado económico se aconseja cuando se busca la máxima eficiencia económica en la gestión de la demanda de agua. Con este método resultan dimensiones mucho más ajustadas que no reducen excesivamente la eficiencia del sistema,

rentabilizando la instalación. El volumen óptimo del depósito —entendiendo por tal el que maximiza la rentabilidad económica del sistema— es siempre menor que el volumen máximo hidráulico calculado.

El caso de estudio propuesto ha puesto de manifiesto una serie de conclusiones. En primer lugar, que un depósito calculado con criterios económicos lleva a volúmenes de depósito y, por tanto, a gastos de instalación considerablemente menores que el clásico método funcional basado en almacenar agua para días, semanas o meses. En segundo lugar, maximizar el aprovechamiento doméstico de los recursos hídricos no es económicamente rentable.

Si se quiere potenciar la implantación de sistemas domésticos de aprovechamiento de lluvia es necesario que se otorguen ayudas o subvenciones externas para compensar la falta de rentabilidad de la instalación.

El uso de series temporales de datos proporciona una mayor precisión a las simulaciones que se realizan para calcular el volumen del depósito; pero, por el contrario, exponen al método de cálculo a los valores atípicos de precipitación. Considerar valores promedios de precipitación es menos preciso, pero más fiable.

Queda por desarrollar una metodología más generalizada que incluya un análisis estadístico de las precipitaciones, tanto en media como en eventos extremos, al estilo de lo desarrollado por Cheng *et al.* (2006), quienes en el dimensionado incluyen la probabilidad de lluvia en un día. En esa línea pueden ir los próximos trabajos sobre este tema.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, que ha financiado los proyectos de investigación CADAGIAS (núm. DPI2006-13113) y DANAIDES (núm. DPI2007-63424).

Recibido: 31/03/09

Aprobado: 11/08/10

Referencias

- AEMET. *Valores Climatológicos Normales* [en línea]. Extracto de la Guía resumida del clima en España 1971-2000. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2008 [consultado el 3 de octubre de 2008]. Disponible para *World Wide Web*: <http://www.aemet.es/es/elclima/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>.
- ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, J., POTENCIANO, A. y VILLAVARDE, J.J. Evolución histórica de sequías en España. *Revista de Obras Públicas*. Vol. 155, núm. 3486, 2008, pp. 53-68.
- BOE. Orden MAM/698/2007, de 21 de marzo, por la que se aprueban los planes especiales de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía en los ámbitos de los planes hidrológicos de cuencas intercomunitarias. Boletín Oficial del Estado. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2007.
- CHENG, C.L., LIAO, M.C. and LEE, M.C. A quantitative evaluation method for rainwater use guideline. *Building Services Engineering Research and Technology*. Vol. 27, No. 3, 2006, pp. 209-218.
- DIN. Norma DIN 1989-1:2002-04. *Rainwater harvesting systems - Part 1: Planning, installation, operation and maintenance*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2002.
- DIXON, A., BUTLER, D. and FEWKES, A. Water saving potential of domestic water reuse systems using greywater and rainwater in combination. *Water Science and Technology*. Vol. 39, No. 5, 1999, pp. 25-32.
- FEWKES, A. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. *Building and Environment*. Vol. 34, No. 6, 1999a, pp. 765-772.
- FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach. *Urban Water*. Vol. 1, No. 4, 1999b, pp. 323-333.
- FRIEDLER, E., BUTLER, D. and BROWN, D.M. Domestic WC usage patterns. *Building and Environment*. Vol. 31, No. 4, 1996, pp. 385-392.
- FUERTES-MIQUEL, V.S. y LÓPEZ-PATÍÑO, G. *Regulación de redes de distribución de agua*. Capítulo 6 de Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. Fuertes et al. (editores). Valencia: Grupo Mecánica de Fluidos, 2002.
- FUERTES-MIQUEL, V.S. y MARTÍNEZ-SOLANO, F.J. *Análisis de caudales*. Capítulo 4 de Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. Fuertes et al. (editores). Valencia: Grupo Mecánica de Fluidos, 2002.
- GHISI, E. Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment*. Vol. 41, No. 11, 2006, pp. 1544-1550.
- HERRMANN, T. and SCHMIDA, U. Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*. Vol. 1, No. 4, 1999, pp. 307-316.
- INE. *Estadísticas e indicadores del agua* [en línea]. Madrid, Instituto Nacional de Estadística [consultado en septiembre de 2008]. Disponible para *World Wide Web*: <http://www.ine.es/revistas/cifraine/0108.pdf>.
- JENKINS, D., PEARSON, F., MOORE, E., SUN, J.K. and VALENTINE, R. *Feasibility of rainwater collection systems in California*. Contribution No. 173. Berkeley: California Water Resources Centre, University of California, 1978.
- LEGGET, D.J., BROWN, R., BREWER, D. and HOLLIDAY, E. *Rainwater and greywater use in buildings. Best practice guidance*. Publication C539. London: CIRIA, 2001.
- LÓPEZ-PATÍÑO, G., MARTÍNEZ-SOLANO, F.J., FUERTES-MIQUEL, V.S. y DELGADO-GALVÁN, X. V. *Dimensionado de depósitos en sistemas de aprovechamiento de aguas pluviales*. VIII Seminario Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimiento de Agua (SERA), del 16 al 19 de julio de 2008, Lisboa, Portugal.
- MIMAM. *La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto* [en línea]. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, 2007 [consultado en junio de 2010]. Disponible para *World Wide Web*: http://www.mma.es/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/ons/noticias_notaspre/pdf/doc_sequia_espana_new.pdf.
- REMOSA. *Tarifa 2007* [en línea] [citado el 20 de enero de 2008]. Disponible para *World Wide Web*: <http://www.remosa.net>.
- SAZAKLI, E., ALEXOPOULOS, A. and LEOTSINIDIS, M. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*. Vol. 41, No. 9, 2007, pp. 2039-2047.
- THOMAS, T. Domestic water supply using rainwater harvesting. *Building Research and Information*. Vol. 26, No. 2, 1998, pp. 94-101.
- VILLAREAL, E.L. and DIXON, A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*. Vol. 40, No. 9, 2005, pp. 1174-1184.

Abstract

LÓPEZ-PATIÑO, G., MARTÍNEZ-SOLANO, F.J., FUERTES-MIQUEL, V.S. & LÓPEZ-JIMÉNEZ, P.A. Sizing of home rain harvesting systems using temporal data series. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 1, January-March, 2011, pp. 51-64.

Home rain harvesting systems are gaining acceptance as an alternative to water supply from distribution networks for non-sanitary uses. This boom has not been accompanied by rigorous technical criteria for the sizing of the elements that make up the system. The aim of this paper is to present some methodologies for sizing rainwater tanks based on functional and/or economical criteria. The result will be a series of equations to calculate the required volume of the tank. In view of the results, it can be verified that the dimensions obtained by applying functional criteria are very different from those resulting from the application of economic criteria and the final decision on the choice of either approach is dependent on the characteristics of the buildings.

Keywords: rainwater utilization, rainwater harvesting, water conservation, storage, hydraulic efficiency.

Dirección institucional de los autores

Ing. Gonzalo López-Patiño

Profesor Titular de Mecánica de Fluidos
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
Teléfono: +34 (96) 3877 000, extensión 86108
Fax: +34 (96) 3877 981
glpatin@gmmf.upv.es

Dr. Francisco Javier Martínez-Solano

Profesor Titular de Mecánica de Fluidos
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
Teléfono: +34 (96) 3877 000, extensión 86104
Fax: +34 (96) 3877 981
jmsolano@gmmf.upv.es

Dr. Vicente Samuel Fuertes-Miquel

Profesor Titular de Mecánica de Fluidos
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
Teléfono: +34 (96) 3877 000, extensión 86105
Fax: +34 (96) 3877 981
vfuertes@gmmf.upv.es

Dra. Petra Amparo López-Jiménez

Profesora Titular de Ingeniería Hidráulica
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia, España
Teléfono: +34 (96) 3877 000, extensión 86106
Fax: +34 (96) 3877 981
palopez@gmmf.upv.es