

# Estimación de la evaporación en los embalses andaluces: propuesta de un índice para la evaluación y clasificación de presas

Santiago García-López<sup>a,c</sup>, Marcia Salazar-Rojas<sup>b,\*</sup>, Mercedes Vélez-Nicolás<sup>a,c</sup>, Jorge M.G.P. Isidoro<sup>d,e</sup>, Verónica Ruiz-Ortiz<sup>b</sup>

a Grupo de Investigación en Geociencias, RNM 373, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Campus Río San Pedro, Universidad de Cádiz, Puerto Real, España.

b Grupo de Investigación en Geociencias, RNM 373, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Algeciras, Campus Bahía de Algeciras, Universidad de Cádiz, Algeciras, España.

c INMAR - Instituto de Investigación Marina, Campus Río San Pedro, Universidad de Cádiz, Puerto Real, España.

d Departamento de Ingeniería Civil, Instituto de Ingeniería, University of Algarve, Campus da Penha, Faro, Portugal.

e CIMA - Centre for Marine and Environmental Research / ARNET - Aquatic Research NETwork, Campus de Gambelas, Faro, Portugal.

\* Autora de correspondencia. Correos electrónicos: santiago.garcia@uca.es (S. García-López), marcia.salazar@uca.es (M. Salazar-Rojas), mercedes.velez@uca.es (M. Vélez-Nicolás), jisidoro@ualg.pt (Jorge M.G.P. Isidoro), veronica.ruiz@uca.es (V. Ruiz-Ortiz).

Journal of Hydrology: Regional Studies 58 (2025) 102224. Listas de contenidos disponibles en ScienceDirect. Página de la revista: [www.elsevier.com/locate/ehrh](http://www.elsevier.com/locate/ehrh). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102224>

Recibido el 10 de octubre de 2024; recibido en versión revisada el 21 de diciembre de 2024; aceptado el 31 de enero de 2025.

Disponible en línea el 7 de febrero de 2025. 2214-5818/© 2025 Los autores. Publicado por Elsevier B.V. Artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Palabras clave: evaporación en embalses; grandes presas; índice de clasificación; embalses andaluces; eficiencia de los embalses.

## RESUMEN

Región de estudio: Este estudio se centra en Andalucía (sur de España), una región mediterránea de 87 270 km<sup>2</sup>. Andalucía experimenta un estrés hídrico significativo, por lo que una gestión eficaz del agua resulta crucial.

Objeto del estudio: La evaporación es un elemento clave del balance hídrico, especialmente en los climas áridos y semiáridos, donde las pérdidas de los embalses representan una fracción significativa del volumen regulado anualmente y comprometen la eficiencia de estas infraestructuras. Este estudio tiene como objetivos (i) estimar el volumen anual de agua evaporada desde las grandes presas (> 5 hm<sup>3</sup>) de Andalucía y (ii) proponer un índice para clasificar los embalses en función de las pérdidas por evaporación.

Nuevos conocimientos hidrológicos para la región: Se recopilaban de fuentes institucionales datos de 76 grandes presas de Andalucía, incluidas sus características descriptivas, detalles morfométricos e información hidrológica. La superficie inundada media mensual se calculó a partir de la curva superficie-volumen-cota (AVE), mientras que la tasa media mensual de evaporación se calculó mediante la ecuación FAO Penman-Monteith utilizando datos meteorológicos. La combinación de ambas variables permitió estimar el volumen medio mensual de agua evaporada en cada embalse. Los resultados se validaron con el contenido isotópico (<sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H) de una selección de embalses. El volumen medio anual evaporado desde los embalses andaluces se estimó en 547 hm<sup>3</sup>/año (8,0 % de las aportaciones). Las pérdidas por evaporación representan el 1,1 % de las aportaciones en los embalses más eficientes, mientras que en otros superan el 30 %, alcanzando el 54 % en el caso más extremo.

## 1. Introducción

La evaporación es un elemento fundamental del ciclo hidrológico que puede provocar grandes pérdidas de agua en las masas de agua superficiales y afectar a otros sistemas ambientales, incluidos los suelos, en función de su grado de humedad, y los acuíferos muy someros. La intervención humana en el ciclo hidrológico mediante la construcción de infraestructuras de regulación, como las presas, modifica el balance hídrico de la región y aumenta la pérdida de recursos hídricos hacia la atmósfera por evaporación. Las pérdidas por evaporación atribuibles a estas infraestructuras hidráulicas pueden estimarse como la diferencia entre la evaporación desde la superficie inundada y la evapotranspiración que podría producirse de forma natural en esa superficie terrestre si no se hubiera construido la infraestructura. Según Témez (2007), en los climas húmedos con áreas densamente vegetadas, la evapotranspiración real (AET) es muy próxima a la evapotranspiración potencial (PET) durante todo el año, porque el suelo dispone de agua suficiente para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera. Por ello, los efectos negativos derivados de la construcción de embalses en términos de pérdidas por evaporación son menos graves. Por el contrario, en los climas áridos y semiáridos, la disponibilidad de agua en el suelo durante la mayor parte del año es muy baja, a veces prácticamente nula. Esto hace que la AET sea significativamente inferior a la PET. En este caso, la inundación del valle provoca un aumento significativo de la disponibilidad de agua respecto a la situación anterior, de modo que la demanda evaporativa de la atmósfera puede satisfacerse por completo, aumentando en consecuencia las pérdidas de agua por evaporación en la zona del embalse.

En la región mediterránea, afectada por un estrés hídrico alto o extremadamente alto, los embalses son elementos estratégicos para la planificación hidrológica y la satisfacción de las demandas de riego, industriales y urbanas, así como para la generación de energía. Dada la importancia de los embalses en estos contextos climáticos, evaluar su impacto sobre los procesos evaporativos y la pérdida asociada de recursos hídricos se convierte en una prioridad. Para minimizar las ineficiencias de las infraestructuras, la evaporación debería recibir especial atención desde las fases iniciales de diseño del embalse y durante las etapas posteriores de explotación, gestión y asignación de recursos. Sin embargo, la magnitud de estas pérdidas por evaporación suele subestimarse debido a las dificultades prácticas y logísticas y a las grandes incertidumbres de su cuantificación (Friedrich et al., 2018). Varios factores afectan a las pérdidas por evaporación; algunos son intrínsecos a la infraestructura (p. ej., la morfometría y el régimen térmico del embalse) y otros son extrínsecos, como el clima (p. ej., temperatura del aire/agua, humedad, velocidad del viento, radiación solar), la fisiografía o el cambio climático (Da Costa et al., 2021; Ruiz-Ortiz et al., 2021). Además, los procesos físicos relacionados con la evaporación son altamente no lineales (Kisi, 2007), lo que dificulta su estimación. Por ejemplo, en los embalses profundos la evaporación es mayor durante el invierno y disminuye en verano respecto a lo esperado, al contrario de lo que ocurre en los embalses someros. Estas diferencias se deben a la regulación térmica ejercida por las capas de agua profundas, que pueden almacenar grandes cantidades de calor; durante la primavera y el verano, la intensa radiación solar se transfiere lentamente, en forma de calor, a las capas más profundas con cierto desfase, debido al elevado calor específico del agua. Posteriormente, en los meses fríos, el calor almacenado retorna a la atmósfera en parte mediante evaporación. Estos fenómenos se intensifican por los procesos de inversión térmica en la masa de agua, que potencian los mecanismos internos de transferencia de calor, como las corrientes de convección.

El objetivo de este estudio es realizar una evaluación preliminar de las pérdidas anuales por evaporación de 76 grandes presas ( $> 5 \text{ hm}^3$ ) de Andalucía (sur de España), una región mediterránea caracterizada por un régimen de precipitaciones muy variable, sequías recurrentes y una especial vulnerabilidad a la escasez de recursos hídricos debido a sus características socioeconómicas. Los resultados se han comparado con el contenido isotópico ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ) de algunos de los embalses analizados. Además, proponemos un índice combinado basado en varias variables morfométricas e hidrológicas para clasificar los embalses según la magnitud de estas pérdidas. La información generada pretende servir de referencia útil para la gestión de los recursos hídricos, así como para la futura explotación y el diseño de embalses en regiones áridas y semiáridas.

## 2. Antecedentes

Como se ha visto anteriormente, la evaporación está influida por diversos factores intrínsecos al embalse y por factores extrínsecos como el clima, la fisiografía y el cambio climático. La magnitud de la evaporación puede variar significativamente entre zonas climáticas y según las características del embalse. Por ejemplo, en los embalses profundos la evaporación suele ser mayor en invierno y menor en verano que en los embalses someros. Estas diferencias estacionales se deben a la regulación térmica ejercida por las capas de agua profundas, a las que se transfiere gradualmente la intensa radiación solar durante la primavera y el verano, liberándose el calor en los meses más fríos.

Para abordar estas dificultades, se han desarrollado varios métodos de cuantificación de la evaporación en embalses. Estos métodos pueden agruparse en cinco categorías principales: 1) mediciones directas; 2) estimación del balance hídrico; 3) balance energético; 4) métodos de transferencia de masa; y 5) ecuaciones semiempíricas.

1. Las mediciones directas suelen basarse en diferentes tipos de tanques de evaporación/evaporímetros o en la aplicación de técnicas de covarianza de remolinos (Eddy Covariance). En cuanto a los primeros, de los muchos tipos de tanques disponibles, el más utilizado es el evaporímetro de clase A por su bajo coste y sencillez (Alazard et al., 2015). Los tanques de evaporación suelen requerir la aplicación de coeficientes reductores para minimizar el «efecto oasis» causado por el calor advectivo, que varía según la ubicación del tanque (Témez, 2007). En este sentido, varios autores (Lowe et al., 2009; Alvarez et al., 2007; Martínez Álvarez et al., 2004) han estimado coeficientes reductores para distintas regiones considerando diferentes factores, como las dimensiones del embalse, la estratificación de la columna de agua, la presencia de plantas acuáticas, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, la turbidez y la salinidad. Estos coeficientes varían a lo largo del año y deben calcularse individualmente para cada mes. La incertidumbre de las estimaciones a partir de tanques de evaporación procede de los coeficientes de corrección, del factor de transposición espacial, de la falta de mantenimiento y limpieza de los dispositivos y de las condiciones meteorológicas desfavorables que pueden impedir mediciones correctas (Craig et al., 2005; Gökbülak y Özhan, 2006; Lowe et al., 2009). No obstante, esta incertidumbre disminuye significativamente si el dispositivo de medición se sitúa cerca del embalse. Por ello, algunos autores incluso sugieren colocar evaporímetros flotantes sobre la superficie del agua para simular mejor las condiciones de evaporación. El método de covarianza de remolinos se basa en cuantificar los flujos superficiales mediante mediciones in situ de la velocidad vertical del viento, la temperatura del aire y la humedad específica utilizando sensores avanzados (p. ej., anemómetros y termómetros sónicos y sensores infrarrojos). Esta metodología garantiza estimaciones precisas de la evaporación, pero su aplicación suele estar limitada por su complejidad y el elevado coste del equipo (Miranda Rodrigues et al., 2020; Althoff et al., 2019). Otro inconveniente es la atenuación de las altas frecuencias causada por el tiempo de respuesta relativamente lento de los sensores, que está mejorando notablemente con los últimos avances tecnológicos.

2. Los métodos de balance hídrico se basan en el principio de conservación de la masa, según el cual las variaciones del volumen almacenado son el resultado de la diferencia entre las salidas y las entradas del sistema. Es necesario medir el agua almacenada y los flujos de agua, aunque algunas variables del balance se consideran despreciables. En este caso, la incertidumbre del método está condicionada por la precisión con que se estiman los distintos elementos del balance hídrico. Puesto que las entradas por precipitación y las salidas por evaporación e infiltración dependen de la superficie del embalse, un cálculo erróneo de esta variable puede conducir a una sobreestimación o subestimación de estos términos (Fowe et al., 2015).

**Tabla 1. Resumen de estudios relevantes sobre evaporación en embalses, lagos y balsas realizados en zonas áridas y semiáridas.**

| Autor                           | Región                         | Embalses, lagos o balsas estudiados           | Pérdida anual por evaporación (hm <sup>3</sup> ) | Métodos                                                             | Limitaciones                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Martínez Álvarez et al. (2004)  | Campo de Cartagena (España)    | 3490 balsas agrícolas                         | 8                                                | Datos de evaporación en tanque y coeficientes de tanque.            | Incertidumbre de los datos de evaporación en tanque.                                                                                                                                 |
| Gökbülak y Özhan (2006)         | Turquía                        | 129 lagos y 223 embalses                      | 6800                                             | Datos de evaporación en tanque y coeficientes de tanque.            | Ausencia de datos durante la estación invernal.                                                                                                                                      |
| López Moreno (2008)             | N de España                    | 7 embalses                                    | 67                                               | Ecuación de Penman.                                                 | La adopción de una velocidad del viento constante por falta de registros fiables puede causar subestimación.                                                                         |
| Martínez-Granados et al. (2011) | SE de España                   | 15 000 balsas agrícolas y 14 grandes embalses | 82                                               | Datos de evaporación en tanque de clase A y coeficientes de tanque. | Problemas de mantenimiento o fallos de sensores que afectan negativamente a la fiabilidad de los datos.                                                                              |
| Wurbs y Ayala (2014)            | Texas (EE. UU.)                | 3415 embalses                                 | 7530                                             | Datos de evaporación en tanque y coeficientes de tanque.            | Extrapolación espacial de los datos de evaporación en tanque. Coeficientes lago/tanque (los estacionales son más precisos que los anuales).                                          |
| Zhang et al. (2017)             | Texas (EE. UU.)                | 200 embalses principales                      | 8000                                             | Datos de evaporación en tanque y coeficientes de tanque.            | La evaporación en tanque supera a la del lago en primavera y verano; en otoño e invierno ocurre lo contrario.                                                                        |
| Zhao y Gao (2019)               | EE. UU.                        | 721 embalses                                  | 33 730                                           | Ecuación de Penman.                                                 | Formulación de la función del viento en la ecuación de Penman.                                                                                                                       |
| El y Mehanna (2019)             | Etiopía y Sudán                | 10 embalses y masas de agua                   | 9130                                             | Ecuaciones analíticas de evaporación modificadas.                   | Falta de datos medidos. El manuscrito no considera los efectos de la variabilidad climática en la temperatura atmosférica, la precipitación ni las tasas de evaporación.             |
| Fuentes et al. (2020)           | Nueva Gales del Sur, Australia | Cuenca del Namoi                              | 202                                              | Ecuación FAO Penman-Monteith.                                       | Limitaciones de las imágenes Landsat. Los supuestos en los conjuntos de datos de referencia, como una velocidad del viento constante, pueden introducir errores en las estimaciones. |
| Tian et al. (2021)              | China                          | 916 grandes embalses                          | 14 020                                           | Ecuación de Penman.                                                 | Sublimación del hielo. Incertidumbre de los datos meteorológicos utilizados para calcular la evaporación.                                                                            |
| Tian et al. (2022)              | Global                         | 7242 embalses                                 | 339 800                                          | Ecuación de Penman.                                                 | Sublimación del hielo. Incertidumbre de los datos meteorológicos utilizados para calcular la evaporación.                                                                            |
| El Bilali et al. (2022)         | Marruecos                      | 49 pequeños embalses                          | 1,5                                              | Datos de evaporación en tanque y coeficientes de tanque.            | Las reducidas fluctuaciones del nivel del embalse provocaron grandes incertidumbres en la estimación de las superficies.                                                             |
| Xia et al. (2022)               | NO de China                    | 167 embalses                                  | 492                                              | Ecuación de Penman.                                                 | Medición de la incertidumbre; incertidumbres de los factores climáticos.                                                                                                             |

| Autor                   | Región                                       | Embalses, lagos o balsas estudiados | Pérdida anual por e vaporación (hm <sup>3</sup> ) | Métodos                                                                                        | Limitaciones                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Li et al. (2023)        | Hubei, China                                 | Embalse de las Tres Gargantas       | 565                                               | Datos de evaporación en tanque y coeficientes de tanque.                                       | Incertidumbre de los datos diarios de evaporación en tanque.                                                                                                                                   |
| Aminzadeh et al. (2024) | Italia, España y Portugal                    | 1800 balsas agrícolas               | 72                                                | Balance energético para cuantificar flujos superficiales y perfiles verticales de temperatura. | La estimación de la superficie depende de la precisión de los datos Global Surface Water. La falta de características detalladas puede afectar a las tasas de evaporación.                     |
| Li et al. (2024)        | Hubei, China                                 | Embalse de Danjiangkou              | 595                                               | Datos de teledetección y método de relación complementaria generalizada (GCR).                 | Falta de valores medidos para comparar. Efecto de la resolución de los datos.                                                                                                                  |
| Nevermann et al. (2024) | Regiones con estrés hídrico en todo el mundo | 10 grandes embalses                 | 26 500                                            | Modelo unidimensional de balance energético basado en procesos físicos.                        | Limitado por los datos necesarios (p. ej., datos meteorológicos y batimétricos de alta resolución) y la complejidad computacional, lo que reduce su idoneidad para aplicaciones a gran escala. |

3. El método de balance energético, también conocido como método de Bowen (BREB), es una técnica relativamente sencilla y práctica para estimar directamente el flujo de calor latente a partir de la ley de conservación de la energía. Requiere medir los gradientes de temperatura y presión de vapor en el aire para calcular la relación de Bowen y los flujos de calor sensible y latente. Para aplicar este método y determinar los parámetros de entrada es necesario monitorizar el perfil de temperatura del embalse, una tarea exigente en términos de instrumentación y personal. En cualquier caso, el método de Bowen suele servir de referencia para compararlo con otros métodos debido a su precisión (Majidi et al., 2015; Rosenberry et al., 2007; Winter et al., 2003) y, a pesar de sus limitaciones, varios autores recomiendan su uso para el seguimiento a largo plazo de los procesos evaporativos (Gianniou y Antonopoulos, 2007; Pérez y Castellví, 2002; Winter et al., 2003). Entre sus limitaciones se encuentran la reducción de la precisión cuando se aplica a masas de agua profundas y la subestimación de la evaporación durante periodos de vientos de alta velocidad (Bozorgi et al., 2020; Finch y Hall, 2001).

Nevermann et al. (2024) y Zhao et al. (2020) buscan mejorar las estimaciones de evaporación mediante una modelización avanzada de la temperatura del agua y el balance energético. Nevermann et al. (2024) utiliza un modelo unidimensional de balance energético basado en procesos físicos para resolver el flujo radiativo y la difusión térmica, calculando directamente la evaporación a partir de las diferencias de presión de vapor y de las condiciones atmosféricas. Zhao et al. (2020), por su parte, emplea el Lake Temperature and Evaporation Model (LTEM), que integra datos MODIS de temperatura superficial del agua para simular perfiles verticales de temperatura, calcular el almacenamiento de calor y mejorar la precisión de la evaporación estacional, especialmente en lagos profundos.

4. Los métodos de transferencia de masa se basan en la ley de Dalton y permiten estimar de forma práctica y precisa la evaporación desde superficies de agua libre. En este caso, las variables de entrada son la velocidad del viento y la diferencia entre la presión de vapor real y la de saturación (El-Mahdy et al., 2021). Uno de los principales inconvenientes del método, según Singh y Xu (1997), es que su aplicación se restringe al área específica en la que se obtuvieron originalmente los datos, ya que los parámetros de entrada no pueden extrapolarse a otros lugares, ni siquiera con condiciones climáticas similares. Debido a la falta de coherencia metodológica en la medición de la temperatura y el viento, existen muchas versiones de la ecuación original que difieren en los parámetros de entrada, lo que dificulta la normalización y la comparación entre estudios. Estas incoherencias surgen de diferencias en las alturas de medición y en los procedimientos de recogida de

datos (Singh y Xu, 1997). Otros errores en el cálculo de la evaporación mediante transferencia de masa están relacionados con imprecisiones en la estimación del coeficiente de transferencia, que depende de la velocidad del viento (Finch y Hall, 2001).

5. La ecuación de Penman (Penman, 1948) y sus variantes, como la ecuación de Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) o la FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006), son métodos robustos y fiables, pero su aplicación a veces está limitada por el gran número de variables meteorológicas necesarias. Como se explicará posteriormente, la fórmula de Penman y sus variantes se utilizan ampliamente en embalses con distintas geometrías y condiciones meteorológicas por su base física y porque combinan los métodos de transferencia de masa y balance energético. En masas de agua muy profundas y estratificadas, y para evitar una sobreestimación del cálculo de la evaporación, conviene considerar el almacenamiento térmico, que puede estimarse mediante la temperatura de equilibrio (Tian et al., 2021; Finch y Hall, 2001; Martínez Álvarez et al., 2004). Asimismo, las variables de entrada necesarias para alimentar la ecuación pueden aumentar la incertidumbre si no existen registros continuos y fiables de la velocidad del viento en la zona (López Moreno, 2008).

En las últimas décadas, la teledetección mediante satélites y, más recientemente, mediante UAV (vehículos aéreos no tripulados) está surgiendo como una herramienta prometedora para estudiar los procesos evaporativos (Guerschman et al., 2009; Martínez Álvarez et al., 2004), y varios autores afirman que el uso integrado de múltiples fuentes de datos de teledetección constituye el futuro para mejorar el seguimiento del agua a escala global y local (Huang et al., 2018; Sogno et al., 2022; Yang et al., 2022).

Varios autores han evaluado la precisión, sensibilidad y sencillez de los métodos mencionados para determinar cuál es el más adecuado para cuantificar la evaporación. Por ejemplo, Majidi et al. (2015) aplicaron el enfoque de balance energético, así como otros 18 métodos, para estimar la evaporación de un embalse en el NE de Irán, y concluyeron que los métodos basados en la temperatura del aire o en su combinación con la radiación solar (p. ej., los métodos de Jensen-Haise y Makkink) ofrecían mejores resultados. Rosenberry et al. (2007) compararon 15 métodos de estimación de la evaporación en un pequeño embalse de montaña del noreste de Estados Unidos. Gorjizade et al. (2014) evaluaron la evaporación en un embalse situado en una región semiárida de Irán utilizando ocho métodos distintos e indicaron que los mejores resultados se obtuvieron con Priestley-Taylor, de Bruin-Keijman y Penman. Sin embargo, dado el gran número de variables de entrada necesarias, estos métodos pueden no ser rentables; en ese caso, otros métodos como Thornthwaite o Papadakis resultarían más adecuados o viables.

En la literatura científica se encuentran varios estudios sobre la cuantificación de la evaporación en embalses, lagos y balsas a distintas escalas. La Tabla 1 resume algunas experiencias relevantes desarrolladas en ambientes áridos y semiáridos.

Debido a la magnitud de la evaporación en muchos embalses, se ha concebido una gran variedad de métodos biológicos, físicos y químicos para reducir las pérdidas de agua de estas infraestructuras. Los métodos biológicos incluyen mantener plantas acuáticas flotantes y plantar cortavientos de árboles o arbustos, alternativas que pueden reducir la evaporación hasta un 47 % y un 6 %, respectivamente (Deepika et al., 2020; Youssef y Khodzinskaya, 2019). Los métodos químicos consisten en añadir al embalse inhibidores de la evaporación, como alcoholes grasos (p. ej., alcohol cetílico/estearílico), para crear una película que dificulte la evaporación, logrando reducciones de hasta el 30 % (Youssef y Khodzinskaya, 2019). Sin embargo, el grave inconveniente de los métodos químicos es la adición de sustancias artificiales al medio natural, lo que puede causar problemas desde el punto de vista ambiental y del consumo. Por último, los métodos físicos son, en general, muy eficientes y reducen la evaporación hasta un 40 %, aunque los costes de inversión y mantenimiento son bastante elevados (Martínez-Alvarez et al., 2010; Shalaby et al., 2021). Estos métodos físicos comprenden alternativas como (i) estructuras flotantes continuas o modulares que reducen la evaporación hasta un 95 % (Youssef y Khodzinskaya, 2019; Aminzadeh et al., 2018; Assouline et al., 2011; Han et al., 2020; Han et al., 2019; Rezazadeh et al., 2020; Shalaby et al., 2021); (ii) inyección de burbujas de aire para romper la estratificación vertical, que logra reducciones de evaporación de hasta el 6 % (Helfer et al.,

2011); y (iii) cubiertas fotovoltaicas flotantes. Este último método ha suscitado gran interés por su doble función: reducir significativamente la evaporación (33-50 %) y generar energía renovable (El Bilali et al., 2022; Miranda Rodrigues et al., 2020), con algunas ventajas adicionales, como ahorrar superficie terrestre, mejorar la generación eléctrica y la posibilidad de combinarlo con generación hidroeléctrica para mejorar la eficiencia económica (Huang et al., 2023).

### 3. Zona de estudio

Andalucía, donde se encuentran los embalses analizados, es una región situada en el extremo meridional de la península ibérica. Con una superficie de 87 270 km<sup>2</sup>, representa el 17 % del territorio español. Desde el punto de vista fisiográfico, de norte a sur pueden identificarse tres dominios: Sierra Morena, el valle del Guadalquivir y las cordilleras Béticas, donde se registran las mayores altitudes del territorio peninsular (3481 m s. n. m.). En concreto, el 45 % del territorio andaluz presenta altitudes superiores a 500 m, correspondientes a los relieves de las cordilleras Béticas; el 25,5 % se sitúa entre 200 y 500 m; y únicamente el 29,5 % presenta altitudes inferiores a 200 m, coincidiendo con la depresión del valle del Guadalquivir y algunas zonas costeras.

Se han descrito seis subcategorías climáticas en la región. La más extendida es la «mediterránea con veranos secos y calurosos e inviernos suaves» (categoría «Csa» según la clasificación de Köppen-Geiger; Köppen, 1936). Los otros cinco subtipos climáticos ocupan extensiones menores de la geografía andaluza. Estos van desde climas semitropicales en el sureste y áridos en el este (subtipos Bsk, Bwk, Bsh y Bwh) hasta climas continentales con inviernos templados y frescos en las zonas montañosas (subtipo Dsh). Las precipitaciones presentan una fuerte irregularidad interanual y se concentran principalmente en los meses de otoño e invierno, siendo prácticamente inexistentes entre junio y septiembre. La precipitación media anual es próxima a 500 mm/año, con un intervalo de 200 a 1100 mm/año, salvo la excepción local de la Sierra de Grazalema, cerca del estrecho de Gibraltar, donde supera los 2000 mm/año. La evapotranspiración potencial (PET) oscila entre 300 mm en las cumbres más altas de los sistemas Béticos y más de 1000 mm en zonas del valle del Guadalquivir. La temperatura media anual es aproximadamente de 16 °C (1998-2007) y muestra una marcada dependencia orográfica. Además, la región presenta una elevada insolación y radiación solar, con medias de 2700 h/año y 5 kw/h/m<sup>2</sup>, respectivamente, debido a su latitud subtropical, al predominio de condiciones anticiclónicas y al elevado ángulo de incidencia solar. Puede encontrarse una descripción detallada de la climatología de Andalucía en Junta de Andalucía (2022a).

En cuanto a la hidrografía, Andalucía se divide en seis demarcaciones hidrográficas (Fig. 1). La más extensa es la cuenca del río Guadalquivir, que atraviesa el territorio de E a O. Las restantes demarcaciones son cuencas menores que drenan hacia el mar Mediterráneo o el océano Atlántico y constituyen varias cuencas intracomunitarias (Cuencas Mediterráneas Andaluzas, cuenca del Guadalete-Barbate y cuenca del Tinto, Odiel y Piedras). Además, el territorio andaluz incluye parte de dos cuencas hidrográficas contiguas: la cuenca del Guadiana y la del Segura (Tabla 2).

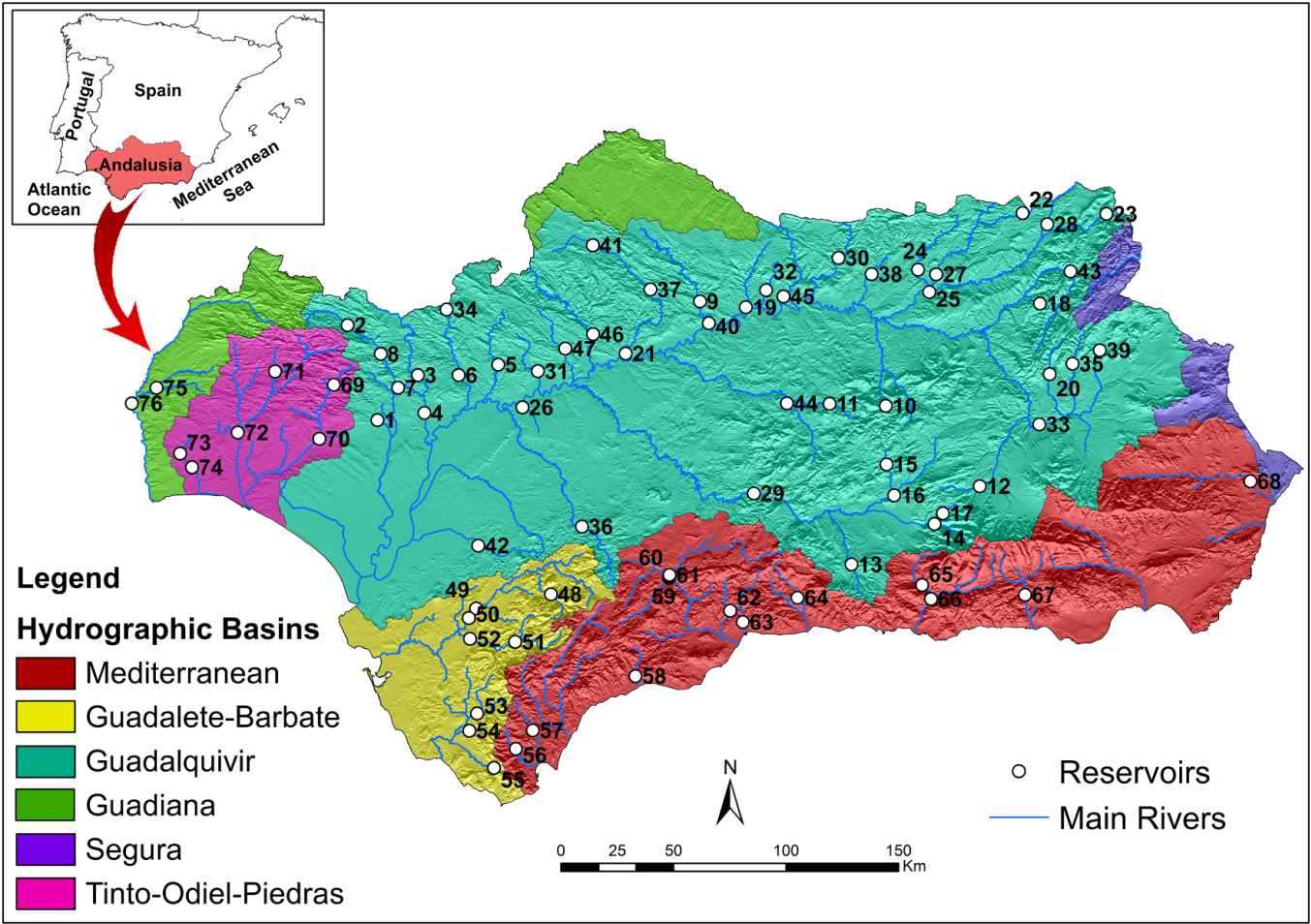


Figura 1. Demarcaciones hidrográficas y ubicación de los 76 embalses considerados en este estudio (modificado de CMAOT, 2014).

Rótulos de la figura en español: Spain = España; Andalusia = Andalucía; Atlantic Ocean = océano Atlántico; Mediterranean Sea = mar Mediterráneo; Legend = leyenda; Hydrographic Basins = cuencas hidrográficas; Mediterranean = Mediterráneas; Reservoirs = embalses; Main Rivers = ríos principales. Se conservan Portugal y los nombres de las cuencas Guadalete-Barbate, Guadalquivir, Guadiana, Segura y Tinto-Odiel-Piedras.

Tabla 2. Extensión de las demarcaciones hidrográficas andaluzas.

| Cuenca hidrográfica     | Superficie total (km <sup>2</sup> ) | Superficie en territorio andaluz (km <sup>2</sup> ) | Superficie de la cuenca en Andalucía (%) | Fracción de Andalucía (%) |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|
| Guadalquivir*           | 57 073                              | 51 486                                              | 90,2                                     | 58,8                      |
| Mediterráneas Andaluzas | 17 964                              | 17 964                                              | 100,0                                    | 20,5                      |
| Tinto, Odiel, Piedras   | 4744                                | 4744                                                | 100,0                                    | 5,4                       |
| Guadalete-Barbate       | 5978                                | 5978                                                | 100,0                                    | 6,8                       |
| Guadiana*               | 55 528                              | 5613                                                | 10,1                                     | 6,4                       |
| Segura*                 | 18 880                              | 1819                                                | 9,6                                      | 2,1                       |
| Total                   | 160 166                             | 87 604                                              |                                          | 100,0                     |

\* Cuencas intercomunitarias.

La población de Andalucía alcanzó los 8 472 407 habitantes en 2021 (INE, 2022), aproximadamente el 18 % de la población española, y muestra una notable tendencia de crecimiento demográfico en los últimos cinco años.

La demanda total anual de agua en Andalucía se estima en 5425 hm<sup>3</sup>/año. La agricultura depende de grandes volúmenes de agua para el riego durante la estación seca y consume unos 4231 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa el 78 % de los recursos hídricos destinados a abastecer las grandes extensiones de cultivo de la región. Además, la mayoría de los sistemas de riego actuales siguen abasteciéndose de agua superficial mediante canales abiertos, con las consiguientes pérdidas por evaporación. El abastecimiento urbano es el segundo consumidor de recursos hídricos (717 hm<sup>3</sup>, equivalentes al 13,2 % del total) (Junta de Andalucía, 2022b). Los recursos hídricos utilizados para satisfacer estas demandas proceden de 80 embalses y más de 100 acuíferos.

## 4. Datos y métodos

Nuestro flujo de trabajo metodológico, compuesto por varias etapas (Fig. 2), se desarrolla como sigue:

La primera etapa de esta investigación consistió en recopilar información de todos los embalses de Andalucía con capacidad superior a 5 hm<sup>3</sup> (un total de 76 embalses) e información meteorológica complementaria. Las fuentes de información utilizadas fueron: (1) Inventario de Presas de España (Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, 2018); (2) Anuarios de Aforos (CEDEX, 2018); (3) el anejo «Sistemas de explotación» del Plan Hidrológico de cada cuenca para el periodo 2022-27; y (4) datos meteorológicos de la Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA). Esta red está gestionada por el IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera - departamento de aguas de la Junta de Andalucía).

La fuente (1) se utilizó para obtener la siguiente información de cada embalse: ubicación, año de construcción, nivel máximo normal, altura desde cimientos, longitud de coronación, volumen del cuerpo de presa, tipo de construcción, superficie de la cuenca, aportación media anual (estimación de proyecto), capacidad del embalse y superficie máxima inundada al nivel máximo normal. Las presas analizadas abarcan un amplio intervalo de alturas desde cimientos, entre 9 y 156 m, con capacidades máximas de almacenamiento entre 5 y 981 hm<sup>3</sup> y distintas tipologías constructivas (materiales sueltos: 44,1 %; gravedad: 38,1 %; arco-gravedad: 9,5 %; arco de doble curvatura: 7,1 %; contrafuertes: 1,2 %). La capacidad máxima de almacenamiento de este conjunto de 76 grandes presas es de 12 199 hm<sup>3</sup> (aproximadamente el 28 % del volumen medio anual de precipitación sobre Andalucía), con una superficie inundada de 608,6 km<sup>2</sup>.

La fuente (2) se utilizó para obtener datos sobre la explotación de cada embalse desde su puesta en servicio hasta 2018. Los años posteriores a 2018 no se consideraron en el presente estudio debido a la sequía persistente que sufrió la región en los años siguientes, que podría sesgar los resultados, especialmente en los embalses puestos en servicio recientemente. En concreto, se consideraron los siguientes aspectos: periodo y número de años de funcionamiento de la infraestructura, aportación media anual durante el periodo de estudio y volumen medio mensual almacenado. Los periodos de explotación y los registros de datos de cada embalse son heterogéneos: de 1943 a 2018 (75 años) para la infraestructura más antigua y de 2012 a 2018 (6 años) para la más reciente. Cabe señalar que las aportaciones se estimaron mediante un enfoque de balance de masas por la administración responsable de la gestión de cada embalse.

La fuente (3) se utilizó para obtener la relación entre el volumen almacenado y la superficie inundada (curva superficie-volumen-cota, AVE). Esto permitió deducir la superficie inundada media mensual de cada embalse durante el periodo de estudio.

Por último, de la fuente (4) se obtuvieron registros diarios de datos meteorológicos de 94 estaciones automáticas para su tratamiento posterior (temperaturas y humedades relativas máximas y mínimas, velocidad del viento y radiación solar). En este caso, el periodo de estudio comprendió 21 años hidrológicos (de octubre de 2000 a septiembre de 2021). A partir de estos datos, la tasa de evaporación de cada embalse se estimó mediante tres métodos distintos (Hargreaves, Penman y FAO Penman-Monteith), según García-López et al. (2023a). Los resultados obtenidos se compararon con los valores proporcionados por Témez (2007), incluidos en los Planes Hidrológicos y en el modelo SIMPA (SIMulación Precipitación-Aportación), un modelo de precipitación-escurrentía utilizado por la Administración para estimar los recursos hídricos a escala nacional (Estrela y Quintas, 1996; Ruiz García, 1998). Finalmente, se seleccionó el método FAO Penman-Monteith para

este estudio por proporcionar los resultados más coherentes (Ec. 1).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad [1]$$

donde  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $u_2$  es la velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $e_s$  es la presión de vapor de saturación ( $\text{kPa}$ ),  $e_a$  es la presión de vapor real ( $\text{kPa}$ ),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $R_n$  es la radiación neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura media diaria del aire ( $^\circ\text{C}$ ) y  $G$  es el flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

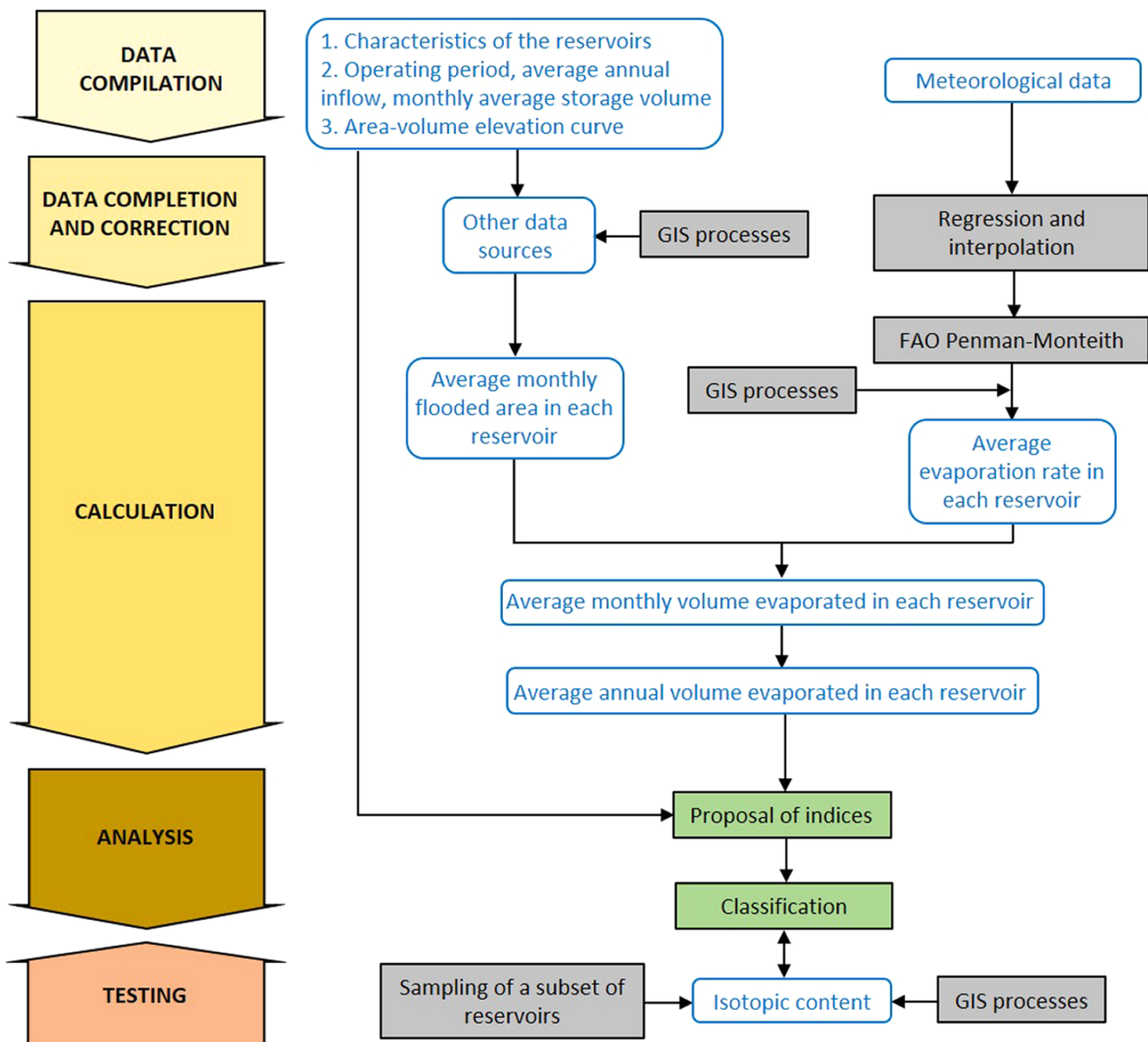


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología seguida en esta investigación.

Rótulos de la figura en español: Recopilación de datos → completado y corrección de datos → cálculo → análisis → comprobación. Características de los embalses; periodo de explotación, aportación media anual y volumen medio mensual almacenado; curva superficie-volumen-cota. Datos meteorológicos → regresión e interpolación → FAO Penman-Monteith → tasa media de evaporación de cada embalse. Otras fuentes de datos y procesos SIG → superficie inundada media mensual de cada embalse. Ambas ramas → volumen medio mensual evaporado en cada embalse → volumen medio anual evaporado en cada embalse → propuesta de índices → clasificación. Muestreo de un subconjunto de embalses y procesos SIG → contenido isotópico ↔ clasificación.

Una vez creada, la base de datos se corrigió para eliminar errores y completar los datos ausentes. En esta etapa se encontraron tres obstáculos principales: (i) no se disponía de datos de aportaciones medias anuales durante la vida operativa de nueve embalses, por lo que esta información tuvo que obtenerse del modelo

SIMPA, considerando las aportaciones medias anuales de un periodo de 25 años; (ii) estos mismos nueve embalses tampoco disponían de datos sobre los volúmenes medios mensuales almacenados. Esta limitación se superó utilizando una fuente de información alternativa ([www.embalses.net](http://www.embalses.net)), que proporciona representaciones gráficas del almacenamiento medio mensual durante los últimos 10 años; y (iii) en cuatro embalses, las fuentes de información no proporcionaban datos de la relación volumen-superficie inundada, por lo que hubo que estimarla mediante procedimientos SIG utilizando un modelo digital del terreno (resolución de  $5 \times 5$  m).

Posteriormente, dado que los datos disponibles sobre la relación «volumen almacenado/superficie inundada» de cada embalse corresponden a pares de datos obtenidos a intervalos regulares de nivel (entre cuatro y siete pares), fue necesario ajustar una función matemática que expresara esta relación mediante el método de mínimos cuadrados. Esto permitió calcular la superficie inundada para un determinado volumen almacenado. Finalmente, el volumen medio mensual evaporado (en  $m^3$ ) de cada embalse se estimó como el producto de la tasa media mensual de evaporación (en  $mm \times 0,001$ ) por la superficie inundada media mensual (en  $m^2$ ) y, por agregación, el volumen anual evaporado. La expresión matemática se presenta en la Ec. [2].

$$V_E = \sum_{i=1}^{12} (R_i \cdot \bar{A}_i) \quad [2]$$

donde  $V_E$ : volumen anual evaporado de un embalse determinado ( $m^3$ );  $R_i$ : tasa de evaporación en el mes «i» (mm);  $\bar{A}_i$ : superficie inundada media en el mes «i» ( $m^2$ ); y  $\bar{A}_i = f(V_i)$ , donde  $f$  es la función de ajuste entre las variables  $A$  y  $V$ ;  $V_i$ : volumen medio almacenado en el mes «i» durante la vida útil.

Una vez calculados, los resultados de evaporación media anual de cada embalse se compararon con varias variables (profundidad, aportaciones, volumen almacenado, altitud). Esta comparación puso de manifiesto diferencias sustanciales que no podían justificarse únicamente por el tamaño del embalse. Esto condujo a proponer un método de clasificación de la eficiencia de los embalses respecto a la evaporación basado en dos índices calculados a partir de parámetros hidrológicos, como se explica a continuación. Ambos índices, denominados «eficiencia de almacenamiento respecto a la evaporación ( $I_1$ )» y «eficiencia de suministro respecto a la evaporación ( $I_2$ )», se definen en el intervalo entre 0 y 1 y se calculan mediante las Ec. [3] y [4]:

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{V_{s,i} - V_{e,i}}{V_{s,i}} \right)}{n} \quad [3]$$

$$I_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{V_{i,i} - V_{e,i}}{V_{i,i}} \right)}{n} \quad [4]$$

donde  $I_1$ : eficiencia de almacenamiento respecto a la evaporación (adimensional);  $I_2$ : eficiencia de suministro respecto a la evaporación (adimensional);  $V_s$ : volumen almacenado (media de un año) ( $hm^3$ );  $V_e$ : volumen evaporado en un año ( $hm^3$ );  $V_i$ : volumen de aportación en un año ( $hm^3$ );  $i$ : cada año durante la vida útil o el periodo de registro;  $n$ : número de años del periodo de registro.

El primer índice ( $I_1$ ) expresa la reducción relativa del volumen almacenado en el embalse durante un periodo determinado. En este caso, incorporar la influencia del tamaño de la infraestructura permite comparar embalses de dimensiones muy diferentes. Mientras que los embalses con pérdidas muy pequeñas hacia la atmósfera tendrán un valor de  $I_1$  muy próximo a 1, aquellos con grandes pérdidas en relación con el volumen almacenado presentarán valores alejados de 1.

El segundo índice ( $I_2$ ) expresa la reducción relativa de los recursos hídricos disponibles como resultado de la evaporación, suponiendo que las aportaciones que entran en el embalse y no retornan a la atmósfera se aprovechan siempre, ya sea para actividades humanas (abastecimiento, riego, energía), usos ambientales (mantenimiento de caudales ecológicos y vegetación de ribera) o su transferencia a otro sistema (como ocurre en embalses con problemas de fugas). Debe destacarse que, en términos de gestión, el agua evaporada puede considerarse un recurso prácticamente perdido.

No obstante, aunque no existen estudios sobre la influencia de la evaporación de los embalses en el microclima local del área específica de este estudio, investigaciones recientes han avanzado en la comprensión del reciclaje de la humedad atmosférica y sus implicaciones para los climas locales. Theeuwes et al. (2023) calcularon la tasa de reciclaje local de humedad (LMR) y encontraron que, de media, el 1,7 % de la humedad evaporada retorna como precipitación local. El estudio también revela una correlación clara entre la LMR y variables como la humedad, la orografía, la latitud, la energía potencial convectiva disponible, la velocidad del viento y la nubosidad total. Esto sugiere que las regiones húmedas con poco viento y fuertes corrientes convectivas son especialmente favorables para una LMR elevada. Zhao et al. (2021) investigaron cómo los factores característicos de los embalses (RCF) influyen en el clima local próximo a ellos. Examinaron las correlaciones entre los RCF de presas y embalses seleccionados y variables meteorológicas globales. Sus principales conclusiones fueron: (a) los RCF se correlacionan negativamente con la evaporación, pero positivamente con la precipitación; (b) las presas y los embalses pueden debilitar o reforzar diversas variables meteorológicas; y (c) los RCF tienen un mayor efecto sobre la precipitación que los factores geográficos, mientras que la evaporación es más sensible a las influencias geográficas. Tuinenburg et al. (2020) presentaron un conjunto de datos de alta resolución sobre conexiones globales de humedad atmosférica y mostraron que aproximadamente el 70 % de la evaporación terrestre retorna como precipitación sobre tierra firme, con variaciones regionales significativas. En conjunto, estos estudios destacan las complejas interacciones entre evaporación, precipitación e intervenciones humanas en el ciclo hidrológico.

Según este índice ( $I_2$ ), los embalses con aportaciones anuales escasas presentarían valores alejados de 1, mientras que aquellos sometidos a procesos de evaporación similares, pero con aportaciones muy grandes, experimentarían una pérdida relativa menor y su índice estaría más próximo a 1.

La consideración simultánea de los índices  $I_1$  e  $I_2$ , con valores límite de 0,95 y 0,875, respectivamente, permitió clasificar los embalses en varias categorías que reflejan la eficiencia de la infraestructura:

- Clase I: eficiencias de almacenamiento y suministro altas.
- Clase II: eficiencia de almacenamiento alta y eficiencia de suministro media.
- Clase III: eficiencia de almacenamiento media y eficiencia de suministro alta.
- Clase IV: eficiencias de almacenamiento y suministro medias.
- Clase V: eficiencia de almacenamiento media y eficiencia de suministro baja.
- Clase VI: eficiencia de almacenamiento baja y eficiencia de suministro media.
- Clase VII: eficiencias de almacenamiento y suministro bajas.

Como complemento de la metodología anterior, la intensidad de los procesos evaporativos se evaluó en una parte de los embalses mediante técnicas isotópicas. Para ello, se muestreó un subconjunto de 23 embalses situados en un amplio intervalo de altitudes y bajo distintas condiciones climáticas, y se analizó su contenido en isótopos estables del agua ( $^1\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ). Las muestras se tomaron en octubre de 2022, después de una sequía intensa y prolongada en la región, a profundidades de entre 30 y 50 cm y, generalmente, a menos de 100 m del muro de la presa. Las determinaciones isotópicas se realizaron en el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA) utilizando un analizador de espectroscopia de absorción láser (Picarro L-2120-I). Los resultados se expresan como desviaciones en partes por mil (‰) respecto al patrón internacionalmente aceptado VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) (Ec. 5):

$$\delta_{\text{sample}}(\text{‰}) = 1000 \left[ \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \right] \quad [5]$$

donde  $R_{\text{muestra}}$  y  $R_{\text{VSMOW}}$  son las relaciones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O}$  para el oxígeno-18 y  $\delta^2\text{H}/\delta^1\text{H}$  para el deuterio) de la muestra y del VSMOW, respectivamente. El error analítico se estima en 0,1 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y 1 ‰ para  $\delta^2\text{H}$ . La altitud media de la cuenca vertiente de cada embalse se calculó en un entorno SIG utilizando el MDT de resolución de 5 m producido por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), para relacionar el contenido isotópico con esta variable.

Desde el inicio del desarrollo de las técnicas isotópicas a finales de la década de 1960, la influencia de la evaporación sobre el ciclo hidrológico y, en particular, sobre el contenido en isótopos estables del agua ha sido inequívoca. Los efectos de fraccionamiento cinético causados por la evaporación son proporcionalmente algo mayores para el  $^{18}\text{O}$  que para el  $^2\text{H}$  y se expresan mediante un parámetro conocido como «exceso de deuterio (d-excess)», que, según Dansgaard (1964), se calcula como sigue (Ec. 6):

$$d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O} \quad [6]$$

Donde d: exceso de deuterio;  $\delta^2\text{H}$ : desviación del contenido de  $^2\text{H}$  respecto al patrón VSMOW según la Ec. 5;  $\delta^{18}\text{O}$ : desviación del contenido de  $^{18}\text{O}$  respecto al patrón VSMOW según la Ec. 5.

El exceso de deuterio es un parámetro isotópico de segundo orden que depende inicialmente de la humedad relativa y la temperatura de la superficie del mar en la fuente de evaporación, y se ha utilizado en todo el mundo para investigar las fuentes de humedad de la precipitación. Mientras que las lluvias de origen atlántico presentan valores medios de exceso de deuterio de +10 ‰ (Dansgaard, 1964), las precipitaciones del Mediterráneo oriental muestran valores superiores a +25 ‰ (Gat y Carmi, 1970) y de hasta +20 ‰ en el caso de algunos episodios de lluvia del Mediterráneo occidental (Cruz-San Julián et al., 1992).

Además de ser útil para identificar el origen de la precipitación, el exceso de deuterio está muy afectado por procesos posteriores a ella, especialmente por la evaporación de las gotas de lluvia bajo la nube durante su caída, que da lugar al efecto de «pseudoaltitud» (Moser y Stichler, 1971), así como por la evaporación cuando el agua se acumula o fluye sobre la superficie terrestre y durante las primeras etapas de infiltración. La evaporación conduce a una reducción del exceso de deuterio respecto a sus valores iniciales (dependientes del origen de la lluvia) e incluso puede dar lugar a valores negativos por el fraccionamiento diferencial de las moléculas de ambos isótopos pesados.

## 5. Resultados y discusión

Tras el tratamiento de los datos, considerando la explotación de los embalses durante toda su vida útil hasta 2018, se obtuvo un volumen medio anual almacenado global de  $6196 \text{ hm}^3$ , es decir, el 51 % de la capacidad máxima de almacenamiento de los 76 grandes embalses estudiados. Este volumen corresponde a una superficie inundada de  $416,5 \text{ km}^2$ , equivalente al 68 % de la superficie al nivel máximo del embalse. Además, la aportación media anual del conjunto de embalses se estima en  $6824 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Como cabría esperar de un clima típicamente mediterráneo, la distribución mensual de los volúmenes almacenados mostró una marcada estacionalidad en el conjunto de embalses, con valores máximos de almacenamiento en primavera (abril-mayo) y mínimos a finales de verano y en otoño (septiembre-octubre), tras los meses secos. Aunque el patrón general es el descrito, cada embalse presenta una evolución mensual característica, según el régimen de aportaciones y la distribución temporal de las demandas locales. La Fig. 3a muestra la distribución mensual del volumen medio almacenado en una selección de ocho embalses durante la vida útil de cada presa, junto con la distribución media de los 76 embalses estudiados (línea de puntos).

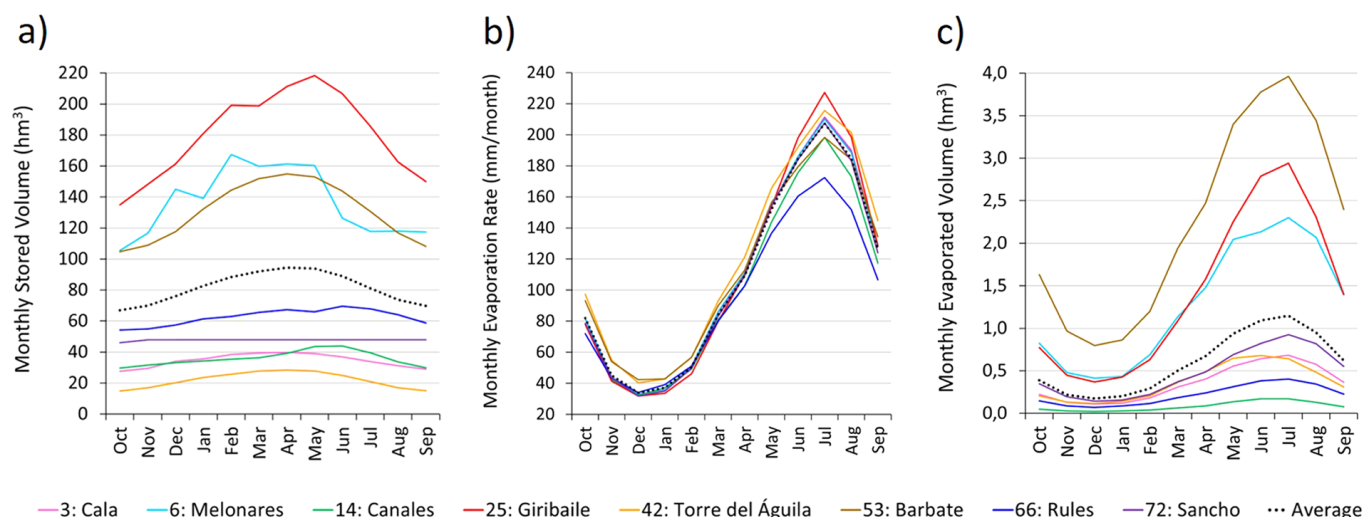


Figura 3. Distribución mensual de a) volumen medio almacenado durante la vida útil, b) tasa media de evaporación y c) volumen medio evaporado durante la vida útil para un conjunto de ocho embalses seleccionados (ubicación indicada en la Fig. 1). Los valores medios de estas variables para los 76 embalses estudiados se representan mediante la línea de puntos.

Rótulos de la figura en español: Monthly stored volume = volumen mensual almacenado ( $\text{hm}^3$ ); Monthly Evaporation Rate = tasa mensual de evaporación (mm/mes); Monthly Evaporated volume = volumen mensual evaporado ( $\text{hm}^3$ ); Average = media. Meses: Oct = oct.; Nov = nov.; Dec = dic.; Jan = ene.; Feb = feb.; Mar = mar.; Apr = abr.; May = may.; Jun = jun.; Jul = jul.; Aug = ago.; Sep = sep. Los nombres de los embalses y sus números se conservan.

Según el método FAO Penman-Monteith, la tasa mensual de evaporación presenta mínimos en diciembre y máximos en julio, con valores medios de 34,0 mm/mes y 207,3 mm/mes, respectivamente, para el conjunto de embalses. La variabilidad de la tasa anual de evaporación entre embalses se sitúa entre 1150 mm/año (embalse 66: Rules) y 1426 mm/año (embalse 42: Torre del Águila), estando ambos valores condicionados fundamentalmente por la temperatura y la radiación medias mensuales. El valor medio de todos los embalses estudiados es de 1297 mm/año, con una desviación estándar de 55 mm/año. La Fig. 3b muestra la distribución media mensual de la tasa de evaporación obtenida para cada uno de los ocho embalses seleccionados, junto con la media del conjunto de las 76 presas estudiadas.

La combinación de los valores mensuales de la tasa de evaporación y la superficie inundada de cada embalse proporciona una primera estimación de la pérdida mensual de volumen por evaporación y, por agregación, una estimación del volumen medio anual evaporado. La Fig. 3c muestra la distribución mensual del volumen medio evaporado de cada embalse seleccionado, junto con el volumen medio mensual evaporado en los embalses. El volumen medio evaporado por embalse es de  $7,2 \text{ hm}^3/\text{año}$ , con una desviación estándar de  $7,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ ; estos valores oscilan entre  $0,3 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el embalse con menor evaporación (embalse 17: Quentar) y  $34,6 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el de mayor evaporación (embalse 52: Guadalquivir). Este amplio intervalo está condicionado por varios factores. Evidentemente, el tamaño y el régimen de explotación del embalse determinan el volumen evaporado. Sin embargo, para un mismo tamaño de embalse pueden existir diferencias importantes atribuibles a su morfología y, en menor medida, a diferencias en la tasa de evaporación. La Fig. 4 muestra que, para un mismo volumen medio almacenado, las pérdidas por evaporación difieren enormemente. Por ejemplo, para un almacenamiento medio de  $130 \text{ hm}^3$ , algunos embalses pierden unos  $8,6 \text{ hm}^3/\text{año}$  (embalse 24: La Fernandina), mientras que otros (embalse 52: Barbate) triplican este valor ( $26,8 \text{ hm}^3/\text{año}$ ).

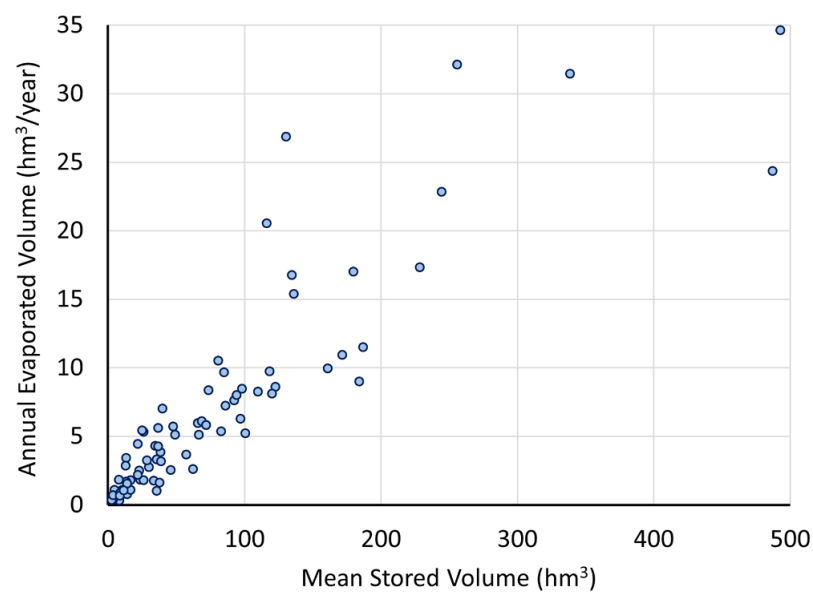


Figura 4. Volumen medio anual evaporado en cada embalse frente al volumen medio almacenado.

Rótulos de la figura en español: Average evaporated volume = volumen medio evaporado; Average stored volume = volumen medio almacenado. Se conservan las unidades y los números identificativos de los embalses.

El volumen medio evaporado anualmente del conjunto de embalses se estima en 547 hm<sup>3</sup>/año, es decir, el 8,0 % de las aportaciones totales. Sin embargo, la relación evaporación/aportación de cada embalse oscila desde valores muy bajos (inferiores al 3 %), encontrados en embalses profundos de zonas montañosas (p. ej., embalses 14: Canales y 17: Quentar) o en embalses infradimensionados con una relación aportación/capacidad superior a 3 (embalses 1: Agrio, 4: Gergal y 7: La Minilla), hasta valores muy altos, superiores al 25 %, en embalses situados en orografías suaves y con aportaciones medias muy inferiores a la capacidad de almacenamiento (embalses 53: Barbate, 64: La Viñuela y 73: Piedras). En general, los mayores volúmenes evaporados corresponden a grandes embalses como el 52: Guadalquivir (34,6 hm<sup>3</sup>/año), el 43: Tranco de Beas (32,1 hm<sup>3</sup>/año) y el 75: Andévalo (31,4 hm<sup>3</sup>/año), todos con capacidades máximas de almacenamiento superiores a 500 hm<sup>3</sup>, aunque con regímenes de explotación muy diferentes. No obstante, destaca el caso de Barbate, un embalse de tamaño mediano-grande con una capacidad máxima de 230 hm<sup>3</sup> donde la evaporación alcanza 26,8 hm<sup>3</sup>/año, atribuible a su batimetría somera (Ruiz-Ortiz et al., 2021).

Como se explicó en el apartado de metodología, la consideración de los índices  $I_1$  e  $I_2$  permite clasificar los embalses. La Fig. 5 muestra ambos índices en un gráfico bivariado y siete categorías (clases) según su eficiencia de suministro y almacenamiento respecto a la evaporación. Los resultados de esta clasificación se presentan en la Tabla 3.

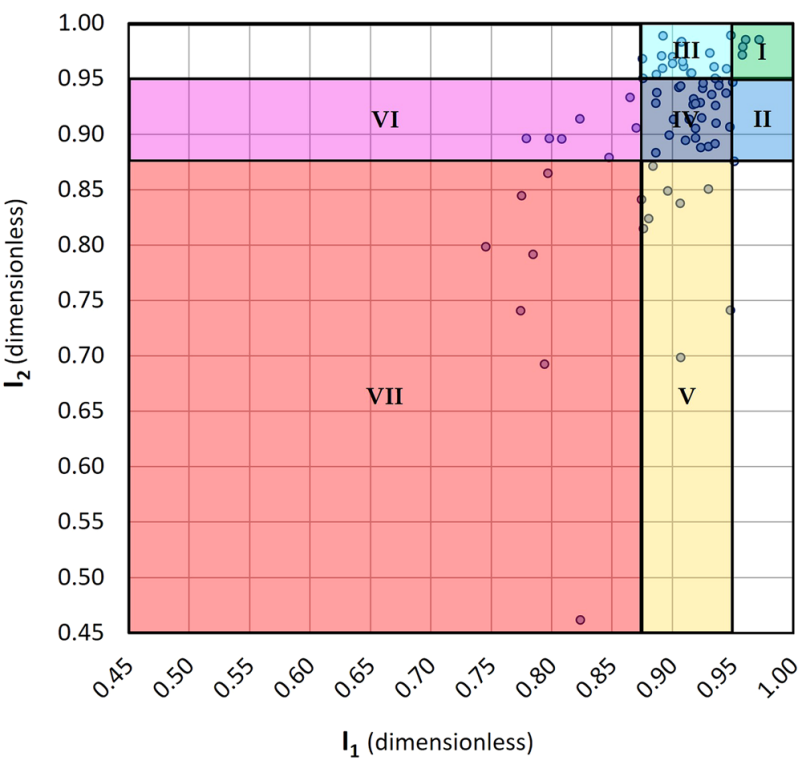


Figura 5. Clasificación de los embalses andaluces según su eficiencia respecto a la evaporación.

Rótulos de la figura en español: Supply efficiency = eficiencia de suministro; Storage efficiency = eficiencia de almacenamiento; Classes I-VII = clases I-VII.  $I_1$  e  $I_2$  son adimensionales.

Tabla 3. Clasificación de los embalses de Andalucía según la metodología propuesta.

| Clase | Eficiencia de almacenamiento respecto a la evaporación ( $I_1$ ) | Eficiencia de suministro respecto a la evaporación ( $I_2$ ) | Número de embalses | Porcentaje de embalses (%) |
|-------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| I     | 0,95-1,00                                                        | 0,95-1,00                                                    | 4                  | 5,3                        |
| II    | 0,95-1,00                                                        | 0,875-0,95                                                   | 2                  | 2,6                        |
| III   | 0,875-0,95                                                       | 0,95-1,00                                                    | 18                 | 23,7                       |
| IV    | 0,875-0,95                                                       | 0,875-0,95                                                   | 29                 | 38,2                       |
| V     | 0,875-0,95                                                       | < 0,875                                                      | 9                  | 11,8                       |
| VI    | < 0,875                                                          | 0,875-0,95                                                   | 7                  | 9,2                        |
| VII   | < 0,875                                                          | < 0,875                                                      | 7                  | 9,2                        |
| Total |                                                                  |                                                              | 76                 | 100                        |

Según este criterio de clasificación, la mayoría de los embalses corresponde a la clase IV, que representa el 38,2 % de las infraestructuras incluidas en este trabajo. Este grupo comprende embalses con eficiencias medias de suministro y almacenamiento, generalmente situados en el curso medio de los ríos, en zonas de topografía suave, donde la evaporación causa pérdidas moderadas de agua cada año.

La segunda categoría más frecuente es la clase III, que representa el 23,7 del total. Incluye embalses caracterizados por una eficiencia de almacenamiento media, pero una eficiencia de suministro alta. En estas infraestructuras, las aportaciones anuales superan varias veces la capacidad del embalse y el volumen perdido por evaporación es relativamente pequeño.

La clase V representa el 11,8 % de los embalses e incluye aquellos con eficiencia de almacenamiento media que, pese a no estar sometidos a condiciones evaporativas extremas, experimentan pérdidas significativas de agua hacia la atmósfera. La razón es que las aportaciones a estos sistemas son relativamente bajas, próximas al volumen máximo del embalse o incluso inferiores. Esta categoría incluye embalses de regulación interanual, donde las entradas de agua de años muy húmedos se acumulan para su uso posterior en años secos, lo que implica una exposición sostenida a la evaporación a lo largo del tiempo.

Las clases VI y VII representan, cada una, el 9,2 % de los embalses estudiados. La clase VI incluye embalses con eficiencia de almacenamiento baja y eficiencia de suministro media debido a sus aportaciones anuales relativamente elevadas, mientras que la clase VII comprende embalses que experimentan una evaporación muy intensa respecto a su volumen medio almacenado y las aportaciones recibidas. Esta última categoría incluye infraestructuras cuyo diseño y/o explotación deberían revisarse, ya que la magnitud de las pérdidas por evaporación puede superar los beneficios aportados por el embalse, sin justificar, por tanto, los impactos hidrodinámicos y ambientales que causan en los ríos regulados. Este aspecto es especialmente relevante en embalses someros de zonas relativamente áridas.

Por último, las clases I y II incluyen el 5,3 % y el 2,6 % de los embalses, respectivamente. Por una parte, los de clase I son infraestructuras con una eficiencia de almacenamiento alta en contextos de evaporación baja, típicas de los embalses de cabecera. Estos embalses se encuentran en valles profundos de zonas montañosas, con bajas tasas de evaporación, y suelen presentar una morfología favorable, con profundidades considerables y superficies relativamente pequeñas. Por otra parte, los embalses que pertenecen a la clase II se encuentran próximos al límite de la clase IV.

Dada la incertidumbre inherente a este tipo de estimaciones y la gran dificultad de cuantificarla, los resultados obtenidos en este trabajo se han evaluado mediante técnicas de trazadores naturales. Para ello, se seleccionaron 23 embalses y se muestrearon una sola vez, como se explicó en el apartado 3.

La Fig. 6a muestra la relación entre el contenido de  $^{18}\text{O}$  y la altitud media de la cuenca vertiente de cada embalse. El ajuste de la recta de regresión es bueno, con  $R^2 = 0,89$  y un gradiente isotópico altitudinal de 0,56 ‰ por 100 m, justificado principalmente por la disminución de la temperatura y la evaporación con la altitud.

El gradiente altitudinal encontrado en el presente estudio prácticamente duplica el indicado por varios autores en muestras de aguas subterráneas de distintas localidades del sur de la península ibérica; por ejemplo, 0,28 ‰ por 100 m en las sierras carbonatadas costeras del este de Andalucía (Benavente et al., 1990) o 0,29 ‰ por 100 m en varios grandes acuíferos carbonatados de Andalucía (Yanes y Moral, 2022). También es notablemente superior a los valores obtenidos en la lluvia en varios estudios realizados en el SE de la península ibérica: 0,27 ‰ por 100 m (García-López, 1996), 0,19 ‰ por 100 m (Vallejos et al., 2015), e incluso superior al gradiente descrito para episodios específicos de precipitación sometidos a fuerte evaporación: 0,40 ‰ por 100 m (García-López et al., 2023b).

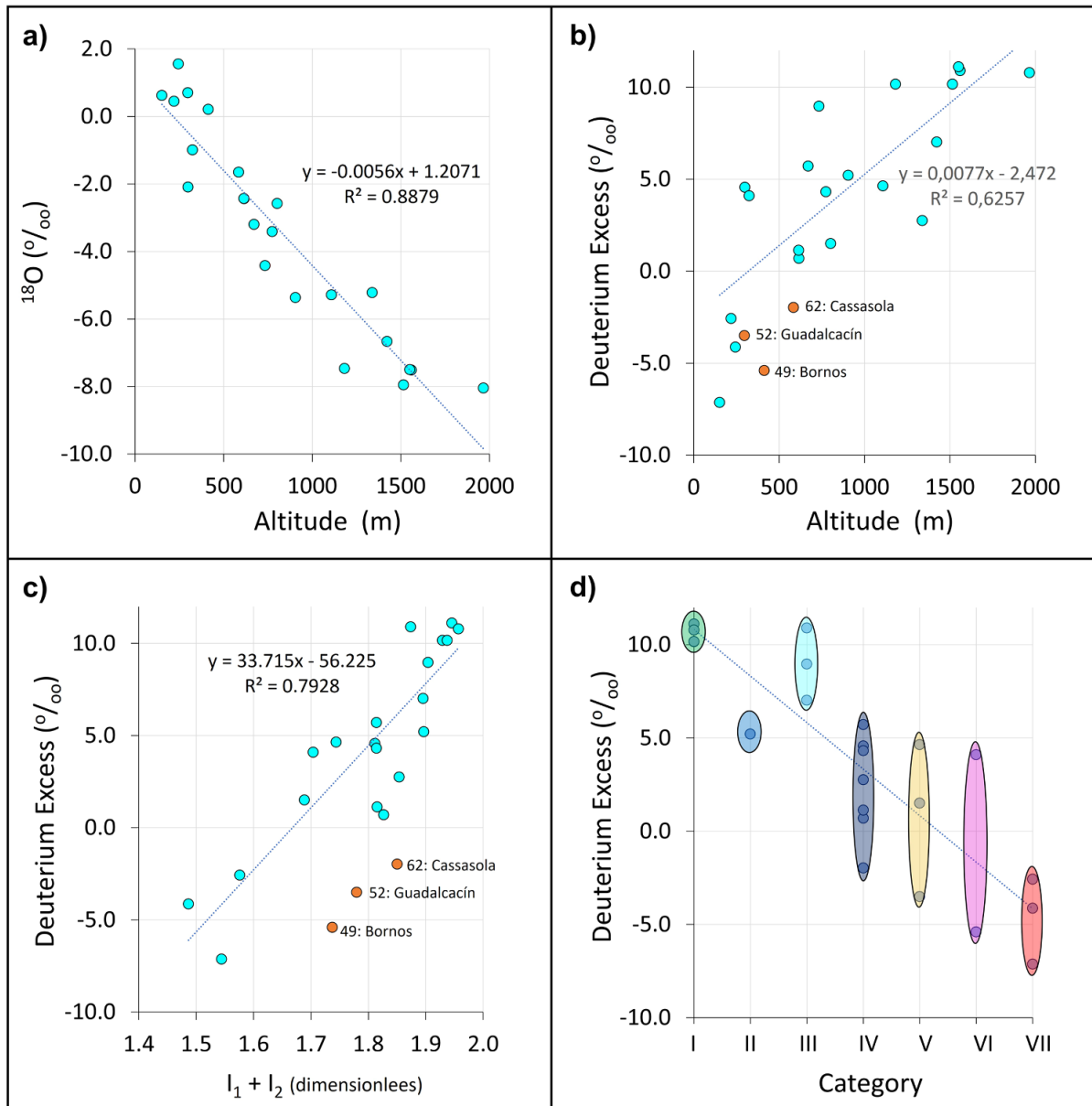


Figura 6. Resultados isotópicos del conjunto de 23 embalses seleccionados. (a) Relación entre  $^{18}\text{O}$  y altitud; (b) relación entre exceso de deuterio y altitud; (c) relación entre exceso de deuterio y la suma de los índices de eficiencia respecto a la evaporación ( $I_1 + I_2$ ); y (d) agrupaciones de valores de exceso de deuterio encontrados en los embalses según la clasificación propuesta en este trabajo.

Rótulos de la figura en español: Deuterium Excess = exceso de deuterio (‰); Altitude = altitud (m); Category = categoría; dimensionless = adimensional. Se conservan las ecuaciones de regresión, los valores de  $R^2$  y los identificadores de los embalses.

Este gradiente más pronunciado puede interpretarse como resultado de la mayor exposición del agua de los embalses a la evaporación respecto a las aguas subterráneas y la precipitación. Mientras que las aguas subterráneas solo experimentan evaporación en las primeras etapas de la infiltración profunda, que ocurre principalmente durante el periodo invernal de recarga, el agua embalsada permanece relativamente estancada y está sometida a una evaporación intensa durante todo el año, especialmente en los meses estivales, cuando el ambiente es más árido (temperaturas altas, radiación solar y humedad del aire muy baja). Esta aridez también depende de la altitud, ya que los embalses a menor cota pueden presentar contenidos de  $^{18}\text{O}$  próximos a 0 o incluso positivos, estando, por tanto, enriquecidos en el isótopo pesado respecto al mar y mostrando valores muy distintos de los de la lluvia que repone el agua embalsada.

Al examinar la relación entre el exceso de deuterio y la altitud en las muestras de los embalses (Fig. 6b), la influencia significativa de la altitud sobre este parámetro sigue siendo evidente, pese a una dispersión algo

mayor. En los embalses cuyas cuencas vertientes se encuentran a altitudes de 1500-2000 m, el exceso de deuterio es ligeramente superior a 10 ‰, un valor característico de las lluvias originadas en el Atlántico, que es la principal fuente de nubes del área estudiada. Por el contrario, los embalses situados a altitudes inferiores a 500 m pueden mostrar incluso valores negativos. En este caso, el ajuste lineal es notablemente peor que para el  $^{18}\text{O}$ , con  $R^2 = 0,63$ , lo que se atribuye al diferente comportamiento de cada embalse respecto a la evaporación. Para una misma altitud, la diferencia de exceso de deuterio entre embalses puede superar los 10 ‰. Sin embargo, al representar el exceso de deuterio frente a la suma de los índices de eficiencia propuestos en este trabajo ( $I_1 + I_2$ ), la línea de tendencia ofrece un mejor ajuste, con  $R^2 = 0,79$ , lo que indica una relación más estrecha entre ambas variables (Fig. 6c). Cabe señalar que se excluyeron del ajuste muestras de tres embalses porque, debido a sus características y explotación, presentaban valores de exceso de deuterio mucho menores de lo esperado, indicativos de evaporación extrema. Fue el caso de los embalses 52: Guadalquivir y 49: Bornos, de tamaño mediano-grande, situados en un sector muy afectado por la sequía en el momento de las campañas de muestreo. El tercer embalse excluido fue el 62: Cassasola, de pequeño tamaño (capacidad máxima de 23 hm<sup>3</sup>) y muy condicionado por su régimen de explotación. Por último, la Fig. 6d muestra los embalses agrupados según las clases de eficiencia respecto a la evaporación y sus contenidos de exceso de deuterio. Como se observa, los embalses más eficientes respecto a la evaporación son aquellos con valores superiores a 10 ‰, mientras que los menos eficientes tienen valores inferiores a 0. Entre ambos extremos, las distintas clases se ordenan de forma muy coherente. Estos resultados corroboran los cálculos realizados en nuestro análisis, con una buena concordancia entre las observaciones isotópicas y las estimaciones de los volúmenes evaporados, lo que confiere credibilidad a los índices propuestos.

El análisis presentado puede considerarse una aproximación preliminar, porque la representatividad de los datos isotópicos depende de forma crítica de la homogeneidad de la masa de agua y de las condiciones de muestreo (Rozanski et al., 2001). Además, los embalses de regulación anual o interanual situados en cuencas afectadas por sequías intensas pueden mostrar fluctuaciones importantes en su firma isotópica debido a diferencias en el tiempo de residencia y el periodo de exposición a la evaporación. La dinámica interna y la naturaleza de cada embalse (p. ej., regímenes monomícticos, dimícticos o polimícticos) afectan a la estratificación térmica y la mezcla de la columna de agua, e influyen directamente en los contenidos isotópicos y en la interpretación del parámetro exceso de deuterio.

## 6. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología integradora para cuantificar la evaporación de los embalses, utilizando fuentes de datos institucionales para estimar los volúmenes mensuales evaporados en cada infraestructura y desarrollar un índice combinado de eficiencia para su clasificación. Además, los resultados se han contrastado con el contenido isotópico ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ) de algunos de los embalses estudiados.

La metodología se aplicó a 76 grandes presas de Andalucía, una región mediterránea, y permitió cuantificar el volumen medio mensual y, por agregación, el volumen anual evaporado en cada embalse. El volumen medio evaporado del conjunto de los 76 embalses es de 547 hm<sup>3</sup>/año, equivalente al 8,0 % de las aportaciones. La evaporación anual de cada embalse depende principalmente de aspectos morfológicos, especialmente de la relación entre superficie inundada y volumen almacenado, de la tasa de evaporación y del régimen de explotación. Sin embargo, pueden identificarse diferencias notables entre embalses; mientras que las infraestructuras más eficientes solo pierden el 1,1 % de sus aportaciones, las más afectadas presentan pérdidas por evaporación superiores al 30 % de las aportaciones, e incluso al 50 % en el caso más extremo. En este último caso, la alteración del régimen natural del río podría superar los beneficios obtenidos de la intervención, poniendo en cuestión la selección del lugar de construcción y la utilidad de la infraestructura en determinados contextos. Este problema se agravaría por el aumento previsible de temperatura y evaporación asociado al cambio climático.

Con el fin de comparar y clasificar los embalses respecto a la evaporación, se han propuesto dos índices, ambos comprendidos entre 0 y 1: el índice de eficiencia de almacenamiento ( $I_1$ ) y el índice de eficiencia de

suministro ( $I_2$ ). Estos índices permitieron diferenciar embalses de eficiencia alta ( $I > 0,95$ ), media ( $0,875 < I < 0,95$ ) y baja ( $I < 0,875$ ) en términos de almacenamiento y suministro. La combinación de ambos índices permite clasificar los embalses en siete categorías. Según este criterio, el 9 % de los embalses de Andalucía pertenece a la categoría de eficiencia baja en almacenamiento y suministro, mientras que únicamente el 5 % presenta un comportamiento excelente respecto a las pérdidas por evaporación. Los resultados se han validado preliminarmente en una selección de embalses mediante el análisis del contenido isotópico de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  y, en particular, del exceso de deuterio. El análisis isotópico respalda las diferencias observadas entre estos embalses en términos de evaporación.

Los autores confían en que el marco desarrollado sea útil para evaluar y optimizar el uso de los recursos hídricos mediante una mejor comprensión del comportamiento de los embalses respecto a la evaporación. Esto permitirá mejorar su explotación y minimizar las pérdidas de agua. Además, se espera que este enfoque contribuya al diseño futuro de infraestructuras y proyectos de recursos hídricos más eficientes. Esto resulta especialmente importante ante el contexto previsible de cambio climático y aumento de la demanda de agua, una preocupación particular en regiones con estrés hídrico.

## Declaración de contribuciones de autoría CRediT

García-López, S.: redacción - revisión y edición; redacción - borrador original; supervisión; metodología; análisis formal; curación de datos; conceptualización. Salazar-Rojas, M.: redacción - revisión y edición; redacción - borrador original; visualización; validación; software; metodología; análisis formal; curación de datos. Vélez-Nicolás, M.: redacción - revisión y edición; redacción - borrador original; validación; metodología; análisis formal; curación de datos. Isidoro, Jorge M.G.P.: redacción - revisión y edición; análisis formal. Ruiz-Ortiz, V.: redacción - revisión y edición; redacción - borrador original; validación; supervisión; metodología; análisis formal; conceptualización.

## Manifestaciones y declaraciones

### Aprobación ética

No procede.

### Consentimiento para participar

Todos los autores dieron su consentimiento para participar.

### Consentimiento para publicar

Todos los autores dieron su consentimiento para publicar.

### Financiación

La tarifa de acceso abierto fue cofinanciada por el Plan Propio-UCA 2025-2027 y el Proyecto QUALIFICA (QUAL21-0019, Junta de Andalucía). Esta investigación fue financiada por el grupo de investigación RNM373-Geociencias-UCA de la Junta de Andalucía y el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Cádiz. Jorge Isidoro agradece el apoyo de la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) portuguesa, a través del proyecto estratégico UIDB/00350/2020 concedido a CIMA (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00350/2020>) y del proyecto estratégico LA/P/0069/2020 concedido a ARNET (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0069/2020>).

### Declaración de conflictos de intereses

Los autores no declaran ningún conflicto de intereses.

### Disponibilidad de datos

Los datos se facilitarán previa solicitud.

## Nota de traducción

Esta versión en español conserva el contenido y la estructura del artículo de García-López et al. (2025), así como las seis figuras originales y las referencias bibliográficas en su idioma original. Se ha adaptado la composición y la paginación para facilitar la lectura. Las equivalencias en español de los rótulos de las figuras se incluyen junto a sus pies; los nombres propios, identificadores y datos de los gráficos se mantienen.

Se han conservado las siguientes incoherencias del original, sin corregir sus datos científicos: la radiación solar figura como «5 kw/h/m<sup>2</sup>»; la Ec. [2] omite el factor 0,001 que sí se describe en el texto para convertir mm a m; las definiciones de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  después de la Ec. [6] intercambian los isótopos; Barbate aparece una vez como embalse 52 y después como 53; se escribe «Cassasola» en el texto y «Casasola» en la figura; la clase III aparece como «23,7 del total» sin signo porcentual en el texto, aunque la Tabla 3 indica 23,7 %. La referencia al muestreo en el «apartado 3» también se conserva, aunque su descripción está en el apartado 4. Estas observaciones pertenecen a la traducción y no al artículo original.

## Referencias bibliográficas

- Alazard, M., Leduc, C., Travi, Y., Boulet, G., Ben Salem, A., 2015. Estimating evaporation in semi-arid areas facing data scarcity: example of the El Haaouareb dam (Merguellil catchment, Central Tunisia). *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 3, 265–284. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.11.007>.
- Allen, G.R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organ. óN. De. las Nac. Unidas Para. la Agric. Y. la Aliment. óN. ISBN 92-5-304219-2.
- Althoff, D., Rodrigues, L.N., da Silva, D.D., Bazame, H.C., 2019. Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. *Agric. Water Manag.* 216 (January), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.028>.
- Alvarez, V., González-Real, M.M., Baille, J., & Molina Martínez, J.M. (2007). A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs Application to South Eastern Spain. 92, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.04.011>.
- Aminzadeh, M., Friedrich, N., Narayanaswamy, S., Madani, K., Shokri, N., 2024. Evaporation loss from small agricultural reservoirs in a warming climate: an overlooked component of water accounting. *Earth's Future* 12 (1). <https://doi.org/10.1029/2023EF004050>.
- Aminzadeh, M., Lehmann, P., Or, D., 2018. Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22 (7), 4015–4032.
- Assouline, S., Narkis, K., Or, D., 2011. Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers. *Water Resour. Res.* 47 (7), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2010WR009889>.
- Benavente, J., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J., García-López, S., Araguás, L., López-Vera, F., 1990. Content analysis of stable iso-topes in aquifers from the coastal mountainous chain of Gádor-Lújar (SE Andalusia, Spain). *Memoires of the XXIIInd Congress of IAH: Water Resources in Mountainous Regions. Vol XXII, part 1*, 415–424. Lausanne.
- Bozorgi, A., Bozorg-Haddad, O., Sima, S., Loáiciga, H.A., 2020. Comparison of methods to calculate evaporation from reservoirs. *Int. J. River Basin Manag.* 18 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1546729>.
- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) Gauging yearbooks. (2018) Available at: (<http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalse-nombre.asp>).
- CMAOT - Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. (2014). Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Available at: (<https://portalrediam.cica.es/VisorRediam/>).
- Craig I., Green A., Scobie M. and Schmidt E. (2005). *Controlling Evaporation Loss from Water Storages*. National Centre for Engineering in Agriculture Publication 1000580/1, USQ, Toowoomba.
- Cruz-San Julián, J., Araguás, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García-López, S., Martínez-Garrido, J.C., Moral, F., Olías, M., 1992. Sources of precipitation over south eastern Spain and groundwater recharge, 1992, 44B, 226.236 *Isot. Study Tellus*. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i3.15445>.
- Da Costa, E.M.B., Lucio, P.S., Maia, A.G., 2021. Relevance of reservoir morphometry in the evaporation process: an evaporation model for semi-arid regions. *Water Resour. Manag.* 35 (14), 4895–4907. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02978-1>.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16 (4), 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>.
- Deepika, S., Osman, M., Kumar, M., Sandeep, H., 2020. Suppressing evaporation from surface water reservoirs: a review. *J. Agric. Eng.* 57 (3), 259–273.
- El, W.M.K.M., Mehanna, M.A., 2019. Estimation of evaporation losses from water bodies in the Sudan and Ethiopia. *Int. J. Energy Water Resour.* 3 (3), 233–246. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00031-x>.
- El Bilali, A., Taghi, Y., Briouel, O., Taleb, A., Brouziyne, Y., 2022. A framework based on high-resolution imagery datasets and MCS for forecasting evaporation loss from small reservoirs in groundwater-based agriculture. *Agric. Water Manag.* 262 (July 2021), 107434. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107434>.
- El-Mahdy, M., Abbas, M., Sobhy, H., 2021. Development of mass-transfer evaporation model for Lake Nasser, Egypt (2021). *J. Water Clim. Change* 12 (1), 223–237. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.116>.
- Estrela, T. & Quintas, L., (1996). A distributed hydrological model for water resources assessment in large basins. *RIVERTECH* 96. 1st International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers. IWRA. Sep.22-26, Chicago. USA.
- Finch, J.W., & Hall, R.L. (2001). Estimation of Open Water Evaporation. A Review of Methods. R&D Technical Report W6-043/TR. In Environment Agency.
- Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J.E., Poussin, J.C., Cecchi, P., 2015. Water balance of small reservoirs in the volta basin: a case study of boura reservoir in Burkina Faso. *Agric. Water Manag.* 152, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006>.
- Friedrich, K., Grossman, R.L., Huntington, J., Blanken, P.D., Lenters, J., Holman, K.L.D., Gochis, D., Livneh, B., Prairie, J., Skeie, E., Healey, N.C., Dahm, K., Pearson, C., Finnessey, T., Hook, S.J., Kowalski, T., 2018. Reservoir evaporation in the Western United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 99 (1), 167–187. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00224.1>.
- Fuentes, I., van Ogtrop, F., Vervoort, R.W., 2020. Long-term surface water trends and relationship with open water evaporation losses in the Namoi catchment, Australia. *J. Hydrol.* 584 (February), 124714. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124714>.
- García-López, S., 1996. *Los Acuíferos Carbonatados Alpujarrides al S.E. de Sierra Nevada. Hidrodinámica, Hidroquímica, Hidrología Isotópica y Cartografía de las Aguas Subterráneas*. Ph. D. Thesis, Univ. De. Granada, Granada, Spain 490.
- García-López, S., Salazar-Rojas, M., Ruiz-Ortiz, V., Vélez-Nicolás, M., Pacheco, M.J., Isidoro, J.M., 2023a. Estimación de la Tasa de Evaporación desde Embalse en Andalucía. *An. Del. XXX Congr. Latinoam. De. Hidr. áulica 2022 – Vol. úMen. 2 – Hidrol. ía Superf. Y. Subterr. ánea 2*, 886–897.
- García-López, S., Vélez-Nicolás, Salazar-Rojas, M., Ruiz-Ortiz, V., Sánchez-Bellón, A., 2023b. Isotopic and remote sensing-based characterisation of a rainfall event over Western Sierra de Gádor (Spain): implications for carbonate aquifer recharge. *Water* 2023 15, 4252. <https://doi.org/10.3390/w15244252>.
- Gat, J.R., Carmi, I., 1970. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *J. Geophys. Res.* 75 (15), 3039–3048. <https://doi.org/10.1029/JC075i015p03039>.

## Referencias bibliográficas (continuación)

- Gianniou, S.K., Antonopoulos, V.Z., 2007. Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *J. Hydrol.* 345 (3–4), 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.007>.
- Gökbulak, F., Özhan, S., 2006. Water loss through evaporation from water surfaces of lakes and reservoirs in Turkey. *Eur. Water Manag. Online* 03, 1–6.
- Gorjizade, A., Akhondali, A.M., Zarei, H., Kaboli, H.S., 2014. Evaluation of eight evaporation estimation methods in a semi-arid region (Dez reservoir, Iran). *Int. J. Adv. Biol. Biomed. Res.* 2 (5), 1823–1836.
- Guerschman, J.P., Van Dijk, A.I.J.M., Mattersdorf, G., Beringer, J., Hutley, L.B., Leuning, R., Pipunic, R.C., Sherman, B.S., 2009. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia. *J. Hydrol.* 369 (1–2), 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.013>.
- Han, K., Shi, K., Yan, X., 2020. Evaporation loss and energy balance of agricultural reservoirs covered with counterweighted spheres in arid region. *Agric. Water Manag.* 238 (311), 106227. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106227>.
- Han, K.W., Shi, K., Bin, Yan, X.J., Cheng, Y.Y., 2019. Water savings efficiency of counterweighted spheres covering a plain reservoir in an arid area. *Water Resour. Manag.* 33 (5), 1867–1880. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02214-x>.
- Helffer, J., Zhang, H., Lemckert, C., 2011. Modelling of lake mixing induced by air-bubble plumes and the effects on evaporation. *J. Hydrol.* 406 (3–4), 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.020>.
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., Wu, J., 2018. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review. *Rev. Geophys.* 56 (2), 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>.
- Huang, J., Shi, K., Shi, X., Hao, G., Yang, Y., 2023. Arid AREAS water-piled photovoltaic prevents evaporation effects research. *Water* 15 (21). <https://doi.org/10.3390/w15213716>.
- INE, Instituto Nacional de Estadística. <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2853&L=0> (accessed: 13/02/2022).
- Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (2022a). <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/web/guest/areas-tematicas/cambio-climatico-y-clima/>. (Last accessed 13/02/2022).
- Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible (2022b). <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturapescaaguaydesarrollorural/areas/infraestructuras-agrarias/regadios/paginas/agenda-regadio.html>. (Last accessed 13/02/2022).
- Kisi, O., 2007. Evapotranspiration modelling from climatic data using a neural computing technique. *Hydrol. Process.* 21, 1925–1934. <https://doi.org/10.1002/hyp.6403>.
- Köppen, W. (1936) *Das geographische System der Klimate*, 1–44 (Gebrüder Borntraeger: Berlin, Germany).
- Li, Y., Li, S., Cheng, L., Zhou, L., Chang, L., Liu, P., 2024. High spatiotemporal estimation of reservoir evaporation water loss by integrating remote-sensing data and the generalized complementary relationship. *Remote Sens.* 16 (8), 1320. <https://doi.org/10.3390/rs16081320>.
- Li, Z., Zhang, X., Jiang, C., Du, T., Zeng, L., 2023. Evolutions of water surface area and evaporation loss of Three Gorges Reservoir based on Landsat images, 1982–2021. *Hupo Kexue/J. Lake Sci.* 35 (5), 1822–1831. <https://doi.org/10.18307/2023.0544>.
- López Moreno, J.I., 2008. Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Pirineo. *Cuad. De. Invest. óN. Geogr. áfica* 34 (0), 61. <https://doi.org/10.18172/cig.1207>.
- Lowe, L.D., Webb, J.A., Nathan, R.J., Etchells, T., Malano, H.M., 2009. Evaporation from water supply reservoirs: an assessment of uncertainty. *J. Hydrol.* 376 (1–2), 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.037>.
- Majidi, M., Alizadeh, A., Farid, A., Vazifedoust, M., 2015. Estimating evaporation from lakes and reservoirs under limited data condition in a semi-arid region. *Water Resour. Manag.* 29 (10), 3711–3733. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1025-8>.
- Martínez Álvarez V., Molina Martínez, J.M. y Soto García, M. (2004). Estimación mediante técnicas SIG, de las pérdidas de agua por evaporación en embalses de riego en la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena. En: *Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección*, Vol II (Conesa García, C., Álvarez Rogel, Y. y Martínez Guevara, J.B., Edrs.), pp. 37–45, Universidad de Murcia.
- Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F., Martín-Gorri, B., Gallego-Elvira, B., 2010. Experimental assessment of shade-cloth covers on agricultural reservoirs for irrigation in south-eastern Spain. *Span. J. Agric. Res.* 8 ( 2 ), 122–133. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008s2-1355>.
- Martínez-Granados, D., Maestre-Valero, F.F., Calatrava, J., Martínez-Alvarez, V., 2011. The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura Basin, SE Spain. *Water Resour. Manag.* 25 (13), 3153–3175. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9850-x>.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. (2018). Spanish Dam Inventory. Formerly available at (<http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/seguridad-de-presas-y-embalses/inventario-presas-y-embalses/>).
- Miranda Rodrigues, C., Moreira, M., Guimarães, R.C., Potes, M., 2020. Reservoir evaporation in a Mediterranean climate: comparing direct methods in Alqueva Reservoir, Portugal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24 (12), 5973–5984. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5973-2020>.
- Moser, H., Stichler, W., 1971. Die Verwendung des Deuterium und Sauersto 18 Gehalts bei hydrologischen Untersuchungen, in English: application of deuterium and oxygen-18 content measurements in hydrological investigations. *Geol. Bavarica* 64, 7–35.
- Nevermann, H., Aminzadeh, M., Madani, K., Shokri, N., 2024. Quantifying water evaporation from large reservoirs: implications for water management in water-stressed regions. *Environ. Res.* 262 (P1), 119860. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119860>.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. A* 193 (1948), 120.
- Pérez, P.J., Castellví, F., 2002. Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña. *Ingeniería Del. Agua* 9 (1), 59–72.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100 (2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2).
- Rezaei, A., Akbarzadeh, P., Aminzadeh, M., 2020. The effect of floating balls density on evaporation suppression of water reservoirs in the presence of surface flows. *J. Hydrol.* 591 (July), 125323. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125323>.
- Rosenberry, D.O., Winter, T.C., Buso, D.C., Likens, G.E., 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *J. Hydrol.* 340 (3–4), 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.018>.
- Rozanski, K., Froehlich, K., Mook, W.G., 2001. Environmental isotopes in the hydrological cycle. *Principles and applications*. Tech. Doc. Hydrol. 121. No 39 Vol. III. UNESCO-IAEA, París.
- Ruiz García J.M. (1998). Desarrollo de un Modelo Hidrológico Distribuido de Simulación continua integrado con un Sistema de Información Geográfica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ruiz-Ortiz, V., García-López, S., Vélez-Nicolás, M., Sánchez-Bellón, A., Contreras de Villar, A., Contreras, F., 2021. Learning from hydrological and hydrogeological problems in civil engineering. Study of reservoirs in Andalusia, Spain. *Eng. Geol.* 282. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105916>.
- Shalaby, M.M., Nassar, I.N., Abdallah, A.M., 2021. Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology. *J. Hydrol.* 598 (October 2020), 126482. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126482>.
- Singh, V.P., Xu, C.Y., 1997. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrol. Process.* 11 (3), 311–323. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19970315\)11:3<311::aid-hyp446>3.0.co;2-y](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19970315)11:3<311::aid-hyp446>3.0.co;2-y).
- Sogno, P., Klein, I., Kuenzer, C., 2022. Remote sensing of surface water dynamics in the context of global change—a review. *Remote Sens.* 14 (10), 1–39. <https://doi.org/10.3390/rs14102475>.
- Témez, J.R., 2007. Consideraciones prácticas sobre la evaporación en los embalses de la España peninsular. *Rev. De. Obras. Públicas* No 3476, 15–22.
- Theeuwens, J.J.E., Staal, A., Tuinenburg, O.A., Hamelers, B.V.M., Dekker, S.C., 2023. Local moisture recycling across the globe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 27, 1457–1476. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1457-2023>.
- Tian, W., Liu, X., Wang, K., Bai, P., Liu, C., 2021. Estimation of reservoir evaporation losses for China. *J. Hydrol.* 596. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126142>.
- Tian, W., Liu, X., Wang, K., Bai, P., Liu, C., Liang, X., 2022. Estimation of global reservoir evaporation losses. *J. Hydrol.* 607 (January), 127524. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127524>.
- Tuinenburg, O.A., Theeuwens, J.J., Staal, A., 2020. High-resolution global atmospheric moisture connections from evaporation to precipitation. *Earth Syst. Sci. Data* 12, 3177–3188. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3177-2020>.

## Referencias bibliográficas (continuación)

- Vallejos, A., Díaz-Puga, M.A., Sola, F., Daniele, L., Pulido-Bosch, A., 2015. Using ion and isotope characterization to delimitate a hydrogeological macrosystem. Sierra de Gádor (SE, Spain). *J. Geochem. Explor.* 155, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.03.006>.
- Winter, T.C., Buso, D.C., Rosenberry, D.O., Likens, G.E., Sturrock, A.M., Mau, D.P., 2003. Evaporation determined by the energy-budget method for Mirror Lake, New Hampshire. *Limnol. Oceanogr.* 48 (3), 995–1009. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.3.0995>.
- Wurbs, R.A., Ayala, R.A., 2014. Reservoir evaporation in Texas, USA. *J. Hydrol.* 510, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.011>.
- Xia, Q., Chen, Y., Zhang, X., Ding, J., Lv, G., 2022. Identifying reservoirs and estimating evaporation losses in a large arid inland basin in Northwestern China. *Remote Sens.* 14 (5), 1105. <https://doi.org/10.3390/rs14051105>.
- Yanes, J.L., Moral, F., 2022. Relief and climate influence on isotopic composition of Atlantic-Mediterranean karst spring waters (Andalusia, southern Spain). *Hydrol. Process.* 36. <https://doi.org/10.1002/hyp.14669>.
- Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M., Chen, F., 2022. A review of remote sensing for water quality retrieval: progress and challenges. *Remote Sens.* 14 (8). <https://doi.org/10.3390/rs14081770>.
- Youssef, Y.W., & Khodzinskaya, A. (2019). A Review of Evaporation Reduction Methods from Water Surfaces.pdf. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705044>.
- Zhang, H., Gorelick, S.M., Zimba, P.V., Zhang, X., 2017. A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. *J. Hydrol.* 555, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.007>.
- Zhao, G., Gao, H., Cai, X., 2020. Estimating lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data. *Remote Sens. Environ.* 251 (August), 112104. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112104>.
- Zhao, G., Gao, H., 2019. Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches. *Remote Sens. Environ.* 226 (April), 109–124. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.015>.
- Zhao, Yiyang, Liu, Suning, Shi, Haiyun, 2021. Impacts of dams and reservoirs on local climate change: a global perspective. *Environ. Res. Lett.* 16, 104043. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac263c>.