

Consideraciones prácticas sobre la evaporación en los embalses de la España peninsular

Practical considerations about evaporation in Spanish reservoirs

José Ramón Témez Peláez. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX . Col. 1.947

Resumen: Se presenta un mapa nacional de evaporación anual deducido a partir de cálculos del CEDEX mediante la fórmula de Penman-Monteith recomendada por la F.A.O. y la A.S.C.E. Asimismo se muestran los valores medios interanuales de 38 tanques evaporimétricos y se hacen una serie de consideraciones sobre los coeficientes correctores que deben aplicarse a esas cifras para deducir las evaporaciones de los embalses situados en sus proximidades. Se llama la atención sobre la dificultad existente para estimar la evaporación de los embalses en períodos inferiores al año y se sugiere un método orientativo para obtener sus órdenes de magnitud.

Palabras Clave: Evaporación; Embalses españoles; Medidas en tanques de evaporación

Abstract: A review of the annual PET map estimated in CEDEX for the White Paper Book of Waters in Spain is presented. PET estimation uses Penman Monteith as the reference model considering FAO and ASCE recommendations. Data from Spanish tanks are also given as well as some comments to estimate their coefficients. Problems in monthly reservoir estimations are remarked.

Keywords: Evaporation; Spanish reservoirs; Evaporation tank

Antecedentes

La referencia bibliográfica mas antigua conocida por el autor sobre el tema que nos ocupa es un artículo de César Villalba publicado en la Revista de Obras Públicas de noviembre de 1927 (Ref. 1). En él se presenta un mapa nacional de evaporación con el gran mérito de ser, como allí se dice, "el primero que de España se publica". Está elaborado con los datos anuales medios del decenio 1914-23 registrados en la red nacional que entonces disponía de evaporímetros Piche en 41 de las estaciones, vaso evaporimétrico solamente en 9 y evaporímetro de balanza en 2. Tiene el serio inconveniente de utilizar fundamentalmente datos del evaporímetro Piche, sencillo y económico pero poco representativo de la evaporación desde el suelo o desde los embalses como hoy se admite con práctica unanimidad.

González Quijano, en otro artículo de la Revista de Obras Públicas de enero de 1942 (Ref. 2) dedicado a consideraciones sobre la evaporación en los grandes

embalses, reconoce tanto el mérito como las anomalías que presenta el mapa de Villalba.

En el año 1965, el Ministerio de Agricultura, publica una monografía de Francisco Elías Castillo "Evapotranspiraciones Potenciales y Balance de agua en España" (Ref. 3), que incluye mapas nacionales de evapotranspiración potencial media anual estimados por tres fórmulas diferentes: Penman, Thornthwaite y Turc. Los autores comentan que la mas fiable de las tres es la de Penman con el inconveniente del escaso número de estaciones que disponen de las medidas necesarias. Dicen también que la fórmula de Thornthwaite suele dar resultados por defecto en las zonas áridas y semiáridas mientras que los de Turc son excesivos en algunas regiones. Los mapas se refieren a la evaporación anual desde suelos cubiertos de césped que como mas adelante se comentará coincide prácticamente con la de los embalses.

Los cálculos de Thornthwaite realizados por estos autores han sido los utilizados por el Instituto Nacional de Meteorología en los Atlas de las referencias 8 y 9, si

bien en los Boletines "Balance Hidráulico Nacional" de los últimos años aplican a escala decenal el método de Penman Monteith, cuyos resultados interanuales, al parecer, aún no han sido publicados.

Jaime Castejón y Vicente Ruíz de Valbuena informan en el Boletín nº 9 de la Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL) del año 1972 (Ref. 4), sobre los esfuerzos que se estaban realizando en nuestro país en ese momento para medir la evaporación. Ponen en entredicho el valor de las medidas del evaporímetro Piche, método ya entonces abandonado por varios países, y refieren que después de un estudio detenido se adoptó por el Centro de Estudios Hidrográficos y por Asinel el tanque de medida de evaporación de clase A, el más extendido en Estados Unidos. En España había en ese momento 28 estaciones evaporimétricas completas montadas por el Centro de Estudios Hidrográficos y 20 montadas por empresas eléctricas, en las cuales se medían temperaturas, humedad, viento, lluvia, insolación y evaporación Piche y tanque A. La mayoría de los tanques de evaporación se colocaron en las inmediaciones de grandes embalses.

Calculos recientes del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

Con motivo de la preparación del "Libro Blanco del Agua" en el año 1996 se llevaron a cabo en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, por Teodoro Estrela Monreal y Javier Álvarez Rodríguez, los más recientes estudios de la evapotranspiración potencial en España de acuerdo con los criterios aceptados por la F.A.O. y por la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) (Ref. 5), que recomiendan el método de Penman-Monteith basado en datos de temperatura, radiación solar, humedad y viento. Los datos mensuales utilizados corresponden al período 1940-95. El número de estaciones completas que realizan este tipo de medidas es insuficiente para extrapolar fiablemente por la geografía nacional los resultados puntuales obtenidos en dichas estaciones, y por ello se recurrió, como fase intermedia, a un mapa nacional estimado por la fórmula de Thornthwaite, cuyas variables (temperatura y latitud) son conocidas en numerosos puntos. Posteriormente se corrigió ese mapa provisional aplicándole los factores que aconsejaron los contrastes de Thornthwaite y Penman-Monteith

realizados en las estaciones completas de cada región.

Se observó que los resultados de Thornthwaite son semejantes a los de Penman-Monteith en las zonas húmedas del Norte y en las proximidades de la costa, mientras que en las zonas secas del interior proporcionan valores menores.

El mapa de la figura 1 está basado en esos cálculos del CEDEX, aún pendientes de revisión. En ella se define la evapotranspiración potencial ET_0 que se produciría desde los suelos si estuvieran todos ellos cubiertos de césped, cuyo valor a escala anual se ha comprobado empíricamente que coincide sensiblemente con la evaporación desde los embalses.

Se observan unas evaporaciones mínimas inferiores a los 500 mm. en algunas cumbres de los Pirineos y Picos de Europa y otras muy altas del orden de 1200 mm. en el entorno de Zaragoza superadas por otras que alcanzan los 1400 mm. en los alrededores de Tarifa a causa de los fuertes vientos de esos lugares. Prescindiendo de esas singularidades, los rasgos generales presentan una tendencia creciente de Norte a Sur desde valores próximos a 700 mm. a valores del orden de 1200 mm.

Las medidas de los tanques de evaporación

La evaporación se puede estimar también a partir de medidas directas en tanques.

El tanque de evaporación tipo A consiste en un recipiente cilíndrico de 4 pies de diámetro y 10 pulgadas de altura colocado a 12 pulgadas sobre el suelo sobre una tarima de madera (fig. 2). Está construido de hierro galvanizado. Existen también variantes del mismo como el tanque tipo B enterrado y el tipo C flotante en las aguas. Las condiciones ambientales de estos dos últimos tipos se aproximan más a las de los suelos y embalses, reduciendo el efecto perturbador del calentamiento de las paredes expuestas al sol, pero tienen serios inconvenientes de explotación y riesgos graves de entradas de agua y brozas.

El modelo utilizado en España, así como mayoritariamente en el mundo, es el del tipo A. El calentamiento de sus paredes provoca un plus de evaporación respecto al de los suelos o embalses colindantes y por ello sus medidas deben afectarse de unos coeficientes reductores, cuyo valor anual es del orden de 0,7, tanto para estimar la evapotranspiración poten-

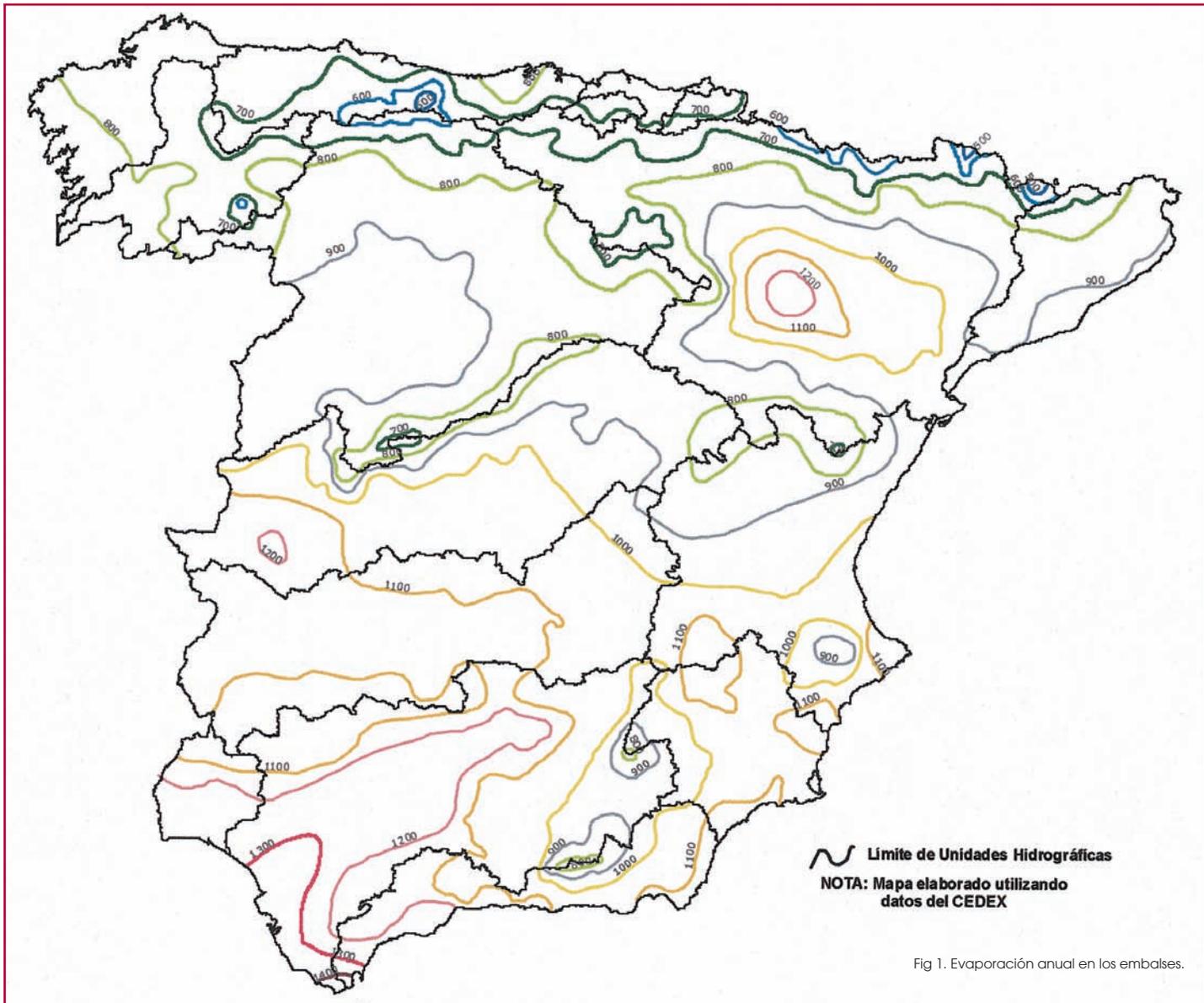


Fig 1. Evaporación anual en los embalses.

cial desde el suelo como la evaporación desde un gran embalse. En climas húmedos ese coeficiente está en el entorno de 0,8 y en los secos de 0,6.

Existe sin embargo, el riesgo de que una ubicación del tanque en lugares con condiciones singulares de exposición a los vientos o de humedad en el entorno provoque valores del coeficiente fuera del rango habitual del mismo. Así lo advierten la F.A.O. y la A.S.C.E. (Ref. 5) y lo confirman por ejemplo los dos tanques de Entrepeñas y Buendía, donde por su vecindad deberían esperarse valores análogos de evaporación y sin embargo presentan cifras de 1430 y 975 mm. respectivamente.

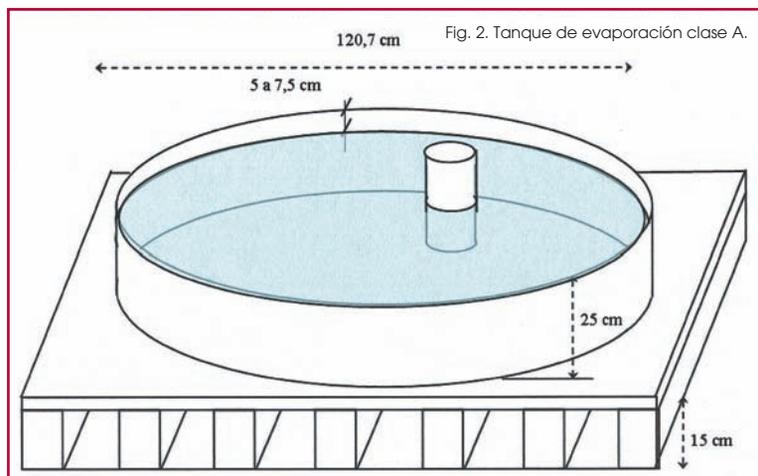


Fig. 2. Tanque de evaporación clase A.

Tabla N° 1. Coeficientes correctores del tanque

Lago ó embalse	Superficie (millas cuadradas)	Profundidad media (pies)	Coefficiente de tanque	Periodo de observaciones	Método de control
Elsinore (California)	8,6	10	0,77	1939-41	Balance de Agua
Red Bluff (Texas)	—	—	0,68	1939-47	Balance de Agua
Okeechobee (Florida)	700	10	0,81	1940-46	Balance de Agua
Hefner (Oklahoma)	3,4	26	0,68	1950-51	Balance de Agua
Felt (California)	0,1	21	0,77	1955	Balance de Agua
Colorado City (Texas)	3,2	16	0,72	1954-55	Balance de energía
Mead (Arizona)	198	176	0,74	1952-53	Bulk aerodynamic
Mendota (Wisconsin)	15,1	40	0,82	27 años	Balance de calor
Salton Sea (California)	300	24	0,52	1961-62	Balance de agua
Silver (California)	20	3	0,61	1938-39	Balance de agua
Fort McIntosh (Texas)			0,79	1950-51	Balance de agua
Kempton Park (Londres)	0,04	23	0,70	1956-62	Balance de agua
Nyasa (Malawi)	11.430	—	0,86	1958-62	Penman
Eucumbene (Nueva Gales del Sur)	37,9	78	0,86	1962-64)	Bulk aerodynamic

Todas las consideraciones hechas en este artículo sobre los valores de los coeficientes reductores que se deben aplicar a las medidas de los tanques tipo A para obtener la evaporación del embalse situado en sus inmediaciones son acordes con las recomendaciones de la F.A.O. y la A.S.C.E. (Ref. 5) y de la O.M.M. (Ref. 6) y están basadas en los contrastes que se han hecho en una serie de embalses o lagos, la mayoría de ellos norteamericanos, donde su evaporación se ha podido deducir directamente con razonable fiabilidad por diversos métodos, entre los que destaca el balance de agua. En la tabla 1, transcrita de la muy interesante referencia 7, se presentan las características de esos embalses (superficie y profundidad media), el período de observaciones, el método de control de medida y el valor obtenido del coeficiente reductor en cada caso.

Datos españoles de los tanques de evaporación

En la Tabla n° 2 se presentan las alturas medias de evaporación anual E en aquellos tanques gestionados por las Comisarías de Agua cuyos registros se han venido publicando en los Anuarios de Aforos de las correspondientes Unidades Hidrográficas. La mayoría de ellos están ubicados en las inmediaciones de los embalses del mismo nombre. Tal como se indica en la tabla, hace años que se han interrumpido las series de datos en la mayoría de las estaciones

de medida excepto en las cuencas del Norte, Duero y Guadalquivir.

Se ha prescindido de los tanques cuyas series sólo disponen de datos homogéneos en un número muy reducido de años, y se han puesto entre paréntesis las cifras de aquellos otros cuyos valores resultan poco representativos de la zona donde están ubicados, previsiblemente debido a las singularidades del emplazamiento de la estación. Exageran claramente la evaporación los de Valdecañas y en menor medida los de Generalísimo y Riaño. Por el contrario infravaloran claramente los de San Juan de Espí, Vilasouto y Buendía, y en menor medida los de Uldecona, Bembezar y Sau.

Las dudas que suscitan las lagunas o valores cero que con cierta frecuencia se observan en los tanques de alta montaña durante los meses de invierno no se han considerado motivo suficiente para invalidar dichos tanques puesto que su repercusión en el total anual carece de importancia práctica.

En la tabla n° 2 se incorporan los datos correspondientes de evaporación E.T., deducidos del mapa de la figura 1, así como su relación ET_0/E con la evaporación E registrada en el tanque que equivale a un coeficiente corrector de dicho tanque.

Los coeficientes correctores se representan en el mapa de la figura N° 3 que muestra en la zona húmeda del Norte valores en el entorno de 0,8, en el centro de la Península en el entorno de 0,65 y en el resto de España Peninsular cifras próximas a 0,7. Todos ellos están en el rango de valores previsibles de

Tabla Nº 2. Evaporaciones medias anuales registradas en los tanques españoles

Unidad Geográfica	Embalse o Lugar	Evapor. ET0 Penman-Monteith mm/año	TANQUE			
			Evapor E mm/año	Periodo de registro	Número de años	Coefficiente ET ₀ /E
NORTE	Salime	710	833	1972-1998	18	0,85
	Barcena	848	1039	1972-2004	24	0,82
	Vilasouto	763	(755)	1972-2004	24	---
DUERO	Barrios de Luna	705	881	1984-1994	11	0,80
	Santa Teresa	883	1301	1971-2003	29	0,69
	Cuerda del Pozo	782	1158	1972-2003	27	0,68
	Poma	672	858	1972-2003	32	0,78
	Aguilar de Campóo	727	970	1972-2003	28	0,75
	Retuerta	791	1170	1973-2003	23	0,68
	Compuerto	698	941	1976-2003	28	0,74
	Urquiza	762	1115	1983-2003	21	0,68
	Cervera-Ruesga	718	862	1979-2003	23	0,83
	La Requejada	693	808	1987-2003	17	0,86
	Camporredondo	697	809	1979-2003	25	0,86
	Villameca	806	1081	1983-2003	12	0,75
	Riaño	645	(903)	1994-2003	11	---
TAJO	Entrepeñas	928	1430	1969-1973	5	0,65
	Buendía	943	(957)	1968-1996	24	---
	Gabriel y Galán	1059	1665	1964-1975	8	0,64
	Gabriel y Galán Granadilla	1059	1669	1969-1979	6	0,64
	San Juan	996	1669	1967-1975	8	0,60
	Valdecañas	1088	(2069)	1970-1980	7	---
GUADIANA	Cijara	1064	1506	1970-1989	14	0,71
	Orellana	1126	1528	1971-1989	15	0,74
GUADALQUIVIR	Iznájar	1128	1586	1968-2004	19	0,71
	Bembezar	1159	(1437)	1969-2004	17	---
	Arcos	1300	1876	1969-1982	8	0,70
	Cala	1107	1465	1970-1993	20	0,76
	Almodovar	1400	1982	1980-2003	11	0,71
	Las Arenas	1189	1663	1974-2004	17	0,72
	Peñaflor	1171	1585	1986-2002	8	0,74
	Guadaira	1185	1621	1988-1999	5	0,73
SUR	Beznar	1023	1382	1993-1999	5	0,74
SEGURA	Los Montesinos	1118	1548	1969-1976	5	0,72
	Torrelamata	1079	1565	1969-1975	5	0,69
	Talave	1174	1441	1975-1985	10	0,76
JUCAR	Uldecoma	944	(1143)	1969-1990	17	---
	Sichar	960	1445	1969-1981	7	0,66
	Generalísimo	956	(1600)	1969-1983	11	---
	Alarcón	929	1358	1969-1993	21	0,69
	Beniarres	900	1294	1969-1979	10	0,70
	Amadorio	1030	1410	1969-1981	10	0,73
EBRO	Ullvarri	691	969	1970-1984	10	0,71
	Urrumaga	682	886	1970-1984	9	0,77
	Canelles	921	1342	1969-1984	12	0,69
	Mequinenza	1015	1610	1969-1984	13	0,63
	Ribarroja	1015	1655	1969-1984	11	0,63
	Caspe	1017	1672	1969-1981	10	0,61
	Santa Ana	965	1337	1969-1981	9	0,72
PIRINEO ORIENTAL	Sau	807	(920)	1969-1989	17	---
	San Juan de Espí	953	(825)	1969-1987	18	---

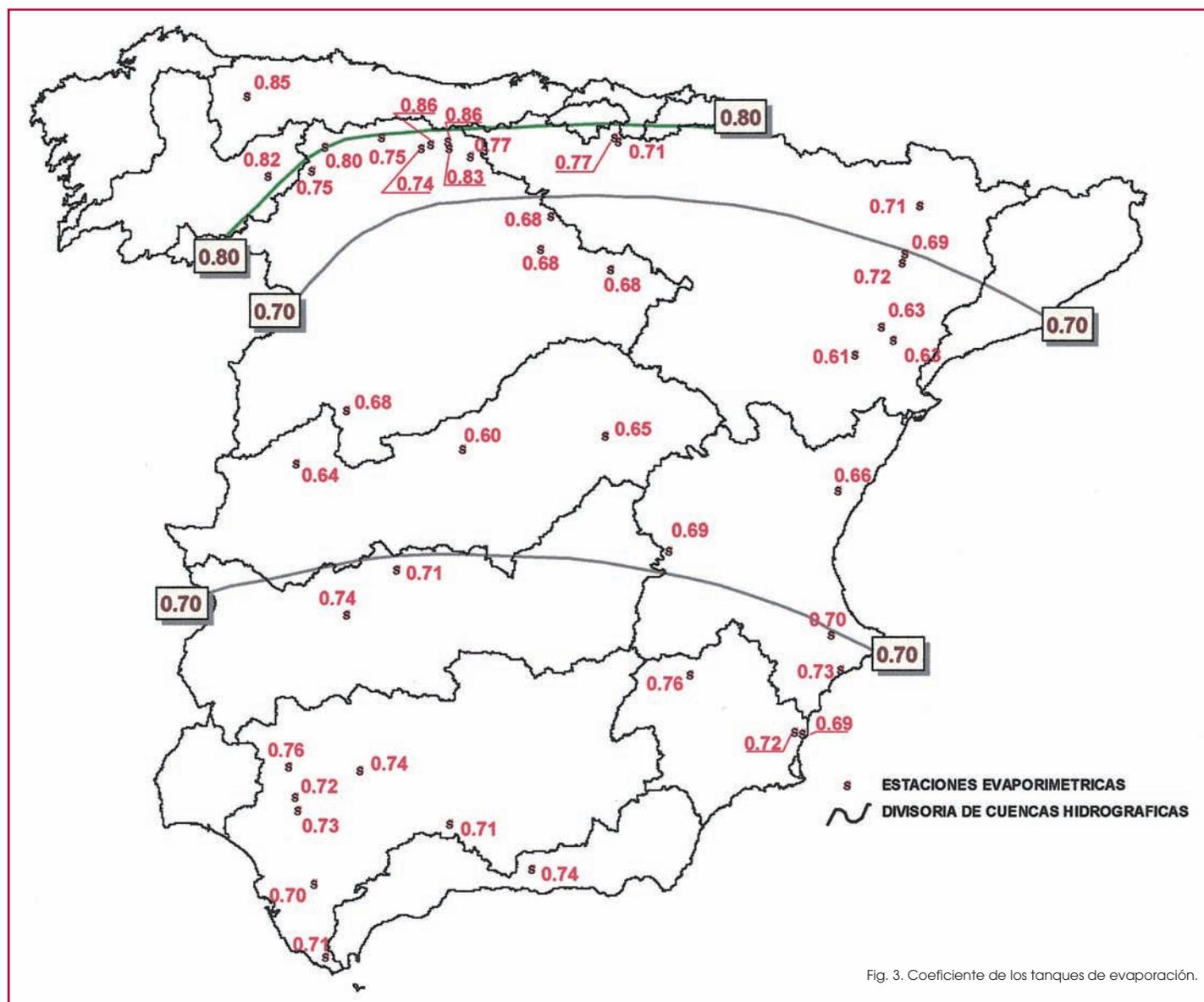


Fig. 3. Coeficiente de los tanques de evaporación.

acuerdo con las indicaciones de la bibliografía especializada y con los resultados empíricos de algunos embalses específicamente controlados, tal como ya se comentó anteriormente en este artículo. Por ello se puede afirmar que los registros del tanque y los cálculos del método Penman-Monteith utilizado por el CEDEX se avalan mutuamente y su contraste refuerza la fiabilidad de ambos.

Evaporaciones mensuales

Todo lo expuesto anteriormente se ha estado refiriendo a valores anuales de la evaporación. El paso a

escala mensual presenta unas dificultades añadidas muy importantes si quiere hacerse con rigor, y en muchos casos deberá optarse por un encaje meramente aproximado del reparto de la evaporación global estimado previamente para el año.

La evaporación desde embalses profundos, en relación con la que tiene lugar desde suelos húmedos o masas de agua someras, se incrementa durante el invierno y se reduce durante el verano. Estas diferencias en los patrones de la evaporación se deben al efecto de regulación térmica que proporcionan las capas profundas de agua, capaces de almacenar grandes cantidades de calor. Puesto que la conductividad térmica del agua es alta, los embalses profundos alma-

Tabla nº 3. Valores mensuales del coeficiente corrector del Tanque A

Lago o Embalse	Altura media (pies)	Coeficiente medio anual	Años	Ener.	Febr.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Agos.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
Elsinore (California)	10	0,77	1939-41 (3 años)	0,82	0,63	0,68	0,66	0,68	0,77	0,74	0,78	0,87	0,93	0,97	0,95
Okeechobee (Florida)	10	0,81	1940-46 (7 años)	0,77	0,69	0,73	0,84	0,82	0,85	0,91	0,91	0,85	0,76	0,71	0,83
Kemptor Park (Londres)	23	0,70	1959	3,00	1,25	0,53	0,53	0,55	0,56	0,64	0,70	0,68	0,93	0,80	0,80
			1960	0,71	0,70	0,60	0,50	0,46	0,72	0,69	0,77	0,91	0,94	0,43	1,33
			1961	0,86	0,33	0,54	0,46	0,63	0,49	0,71	0,66	0,90	1,42	1,15	3,00
			1962	0,50	0,77	1,18	0,47	0,67	0,83	0,71	0,80	0,82	1,18	1,63	9,00
			Media 4 años	1,14	0,62	0,66	0,50	0,58	0,57	0,68	0,74	0,81	1,09	1,28	1,54
Salton Sea (California)	24	0,52	1961-62 (2 años)	0,53	0,46	0,37	0,40	0,47	0,39	0,46	0,47	0,56	0,70	0,77	0,57
Eucumbene (Nueva Gales del Sur)	78	0,86	1962	0,73	0,81	0,86	1,17	2,04	1,49	1,15	1,20	0,61	0,69	0,48	0,72
			1963	0,77	0,91	1,00	0,95	2,04	2,37	2,53	0,95	0,62	0,31	0,66	0,73

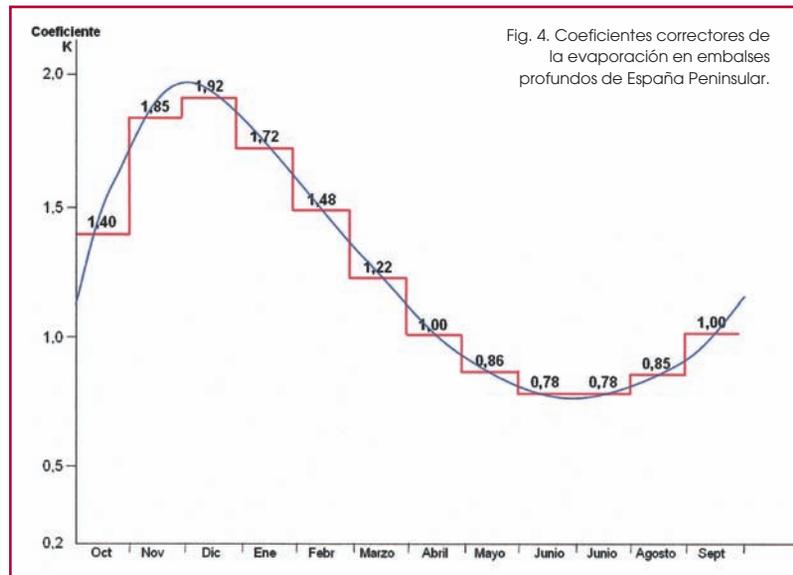
cenan energía durante la primavera y el verano y la sueltan durante el otoño y el invierno.

El desajuste entre los ritmos de evolución de la evaporación desde un suelo húmedo o una masa de agua somera y el de un embalse profundo se acentúa con la profundidad de dicho embalse y la irregularidad del clima donde se ubica.

Para estimar la evaporación de un embalse profundo a escala temporal inferior a un año, en algunos casos singulares se han aplicado métodos, cuyo uso no se ha generalizado debido a su compleja explotación. Unos han recurrido a grandes tanques de evaporación sumergidos en el embalse, otros a medidas de los perfiles de la temperatura del agua en lugares representativos.

En la referencia nº 7, se han publicado los valores de los coeficientes correctores mensuales de los tanques relativos a algunos de los embalses singulares de la tabla nº 1 donde ha existido control directo de su evaporación durante un cierto período. Las grandes variaciones de unos lugares a otros, de unos meses del calendario a otros, e incluso los que para un mismo lugar y mes hay de unos años a otros (véase Tabla nº 3) dan idea de la complejidad del problema. La información de esos coeficientes no es de aplicación inmediata y deben adecuarse las cifras a las condiciones climáticas y de profundidad media de cada caso, pero ha permitido al autor proponer la ley de la

figura nº 4, donde se definen para cada fecha del año el coeficiente K que debe aplicarse a la evaporación ET_0 de un punto calculada por Penman-Monteith (ET_0) o bien en su caso a la deducida a partir del tanque con su coeficiente corrector anual (C.E.), para obtener la correspondiente a un embalse profundo situado en ese mismo lugar de la España Peninsular. La ley, como puede suponerse, sólo tiene un carácter orientativo de los ordenes de magnitud de ese coefi-



ciente de embalse K, pero puede ser útil en la práctica a falta de mejor información.

Pérdida de agua por la presencia de embalses

Es práctica habitual considerar que los recursos hídricos de una cuenca, por el mero hecho de implantar un embalse, sufren una merma respecto a los correspondientes al régimen natural previo a la obra igual a la evaporación que tiene lugar desde dicho embalse, y eso no es verdad.

Desde el área inundada se produce la máxima evaporación ET_0 , que permite el poder evaporante de la atmósfera pues siempre hay disponibilidad de agua, pero también es cierto que desde esos mismos suelos de la cuenca, en la etapa previa a la implanta-

ción del embalse, se evaporaba una parte E_r del agua de lluvia precipitada sobre ellos, y por tanto la merma de recursos atribuible a la obra se reduce a la diferencia entre ambas evaporaciones ET_0 y E_r .

Así, por ejemplo, en un embalse del Norte de España con régimen abundante y frecuente de lluvias, la evaporación real desde el suelo E_r es muy próxima a la potencial ET_0 , pues solamente en raras ocasiones falta humedad en el suelo para alimentarla, y consecuentemente la inundación de esos terrenos con un embalse apenas va a suponer incremento de la evaporación o merma de recursos hídricos. No sucede lo mismo en las zonas áridas del Sur donde es muy grande el déficit de evaporación, o diferencia entre la evaporación potencial ET_0 y la evaporación real E_r muy limitada por la escasez de agua disponible en el suelo. ♦

Referencias:

- 1. VILLALBA C. (1927). "Las pérdidas de evaporación en España". Revista de Obras Públicas nº 2.488.
- 2. GONZÁLEZ QUIJANO P. (1942). "Medida y cálculo de la evaporación". Revista de Obras Públicas. Enero.

- 3. ELIAS F Y GIMÉNEZ R. (1965). "Evapotranspiraciones Potenciales y Balance de Agua en España". Dirección General de Agricultura.
- 4. CASTEJÓN Y RUÍZ DE VALBUENA V. (1972). "Evaporación de los embalses". Boletín Asinel nº 9.
- 5. A.S.C.E. (1991). "Evapotranspiration and irrigation Water Requirements". American Society of Civil Engineers.

- 6. O.M.M. (1994). "Guía de Prácticas Hidrológicas". Organización Meteorológica Mundial.
- 7. AUSTRALIAN WATER RESOURCES COUNCIL (1970). "Evaporation From Water Storages". Australian Department of National Development.
- 8. I.N.M. (1983). "Atlas Climático de España". Instituto Nacional de Meteorología.
- 9. I.N.M. (1992). "Atlas Nacional de España. Climatología". Instituto Geográfico Nacional.