

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 10. MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN	336
10.1 Generalidades	336
10.1.1 Definiciones	336
10.1.2 Unidades y escalas	336
10.1.3 Requisitos meteorológicos	336
10.1.4 Métodos de medición.	337
10.2 Atmómetros	338
10.2.1 Tipos de instrumentos	338
10.2.2 Mediciones realizadas mediante atmómetros.	338
10.2.3 Fuentes de error.	338
10.3 Evaporímetros de cubeta y tanques de evaporación	339
10.3.1 Cubeta estadounidense de clase A	339
10.3.2 Evaporímetro ruso de cubeta GGI-3000.	339
10.3.3 Tanque ruso de 20 m ²	340
10.3.4 Mediciones realizadas mediante cubetas y tanques de evaporación .	340
10.3.5 Exposición	340
10.3.6 Fuentes de error.	341
10.3.7 Mantenimiento	342
10.4 Evapotranspirómetros (lisímetros)	342
10.4.1 Mediciones realizadas mediante lisímetros	343
10.4.2 Exposición	344
10.4.3 Fuentes de error.	344
10.4.4 Mantenimiento	345
10.5 Estimación de la evaporación a partir de superficies naturales.	345
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	348

CAPÍTULO 10. MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN

10.1 GENERALIDADES

10.1.1 Definiciones

El *Glosario Hidrológico Internacional* (OMM/UNESCO, 2012) y el *Vocabulario Meteorológico Internacional* (OMM, 1992) proporcionan (aunque cabe señalar algunas diferencias) las definiciones siguientes:

Evaporación (real): cantidad de agua que se evapora de una superficie de agua libre o del terreno.

Transpiración: proceso por el que el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en forma de vapor.

Evapotranspiración real (o evapotranspiración efectiva): cantidad de agua evaporada del suelo y de las plantas cuando el terreno se encuentra con su contenido natural de humedad.

Evaporación potencial (o evaporatividad): cantidad de vapor de agua que puede ser emitida por una superficie de agua pura, por unidad de superficie y por unidad de tiempo, en las condiciones existentes.

Evapotranspiración potencial: cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un clima dado por una cubierta vegetal continua bien dotada de agua. Incluye la evaporación del suelo y la transpiración vegetal en una región determinada y en un intervalo de tiempo dado, expresada en altura de agua.

Cabe señalar que cuando se utilice el término *evapotranspiración potencial*, se deberán indicar claramente los tipos de evaporación o transpiración de los que se trate. En OMM (2008, volumen I) se pueden consultar más detalles sobre estos términos.

10.1.2 Unidades y escalas

La tasa de evaporación se define como la cantidad de agua que se evapora de una unidad de superficie por unidad de tiempo. Puede expresarse como la masa o el volumen de agua líquida que se evapora de esta forma. Habitualmente, se trata de la altura del agua líquida que vuelve a la atmósfera por unidad de tiempo, evaporándose desde toda la superficie que se examina. La unidad de tiempo es normalmente el día, y la cantidad de evaporación debería expresarse en milímetros (OMM, 2010). Según el tipo de instrumento, la resolución de las medidas varía generalmente de 0,1 a 0,01 mm.

10.1.3 Requisitos meteorológicos

Las estimaciones de la evaporación a partir de superficies de agua libre y del suelo, así como la evapotranspiración a partir de superficies cubiertas por vegetación, desempeñan un papel de gran importancia en la modelización hidrológica y en los estudios hidrometeorológicos y agrícolas, por ejemplo en lo que respecta al diseño y a la explotación de los embalses y de las redes de riego y de drenaje.

Los requisitos de rendimiento se dan en el capítulo 1 de la parte I. Para los totales diarios, el rango exterior extremo va de 0 a 100 mm, con una resolución de 0,1 mm. La incertidumbre, al 95% del nivel de confianza, debería ser de $\pm 0,1$ mm para cantidades menores de 5 mm y del $\pm 2\%$ para cantidades mayores. Se ha propuesto la cifra de 1 mm como margen de error factible. En principio, los instrumentos normales podrían alcanzar estos requisitos de exactitud, pero las dificultades con la exposición y el manejo práctico son la causa de errores mucho mayores (OMM, 1976).

Los factores que influyen en la tasa de evaporación de cualquier cuerpo o superficie se pueden dividir de manera general en dos grupos, a saber, los factores meteorológicos y los factores propios de la superficie; cualquiera de ellos puede limitar el valor de la tasa. A su vez, los factores meteorológicos se pueden subdividir en variables energéticas y aerodinámicas. La evaporación del agua líquida exige una energía que existe abundantemente en la naturaleza en forma de radiación solar y terrestre. Las variables aerodinámicas, como la velocidad del viento a nivel de la superficie y la diferencia de la presión de vapor entre la superficie y la atmósfera que se halla en contacto con ella, rigen la tasa de transferencia del vapor de agua evaporada.

Conviene hacer una distinción entre las situaciones en las que existe agua libre en la superficie y las que no. Entre los principales factores que entran en juego cabe señalar la cantidad y el estado del agua, así como también las características de la superficie que influyen en el proceso de transferencia hacia la atmósfera o a través de la superficie del cuerpo que se examina. La resistencia a la transferencia de humedad hacia la atmósfera depende, por ejemplo, de la rugosidad de la superficie; en las regiones áridas y semiáridas, la extensión y la forma de la superficie desempeñan también un papel fundamental. La transpiración vegetal depende de factores meteorológicos y de las características de la superficie mencionadas anteriormente, y también depende en gran medida de las características y de las reacciones de las plantas y especialmente del número, tamaño y grado de apertura de los estomas. La resistencia de los estomas a la transferencia de humedad indica una reacción diurna, pero también depende considerablemente de la humedad del suelo donde crecen las raíces.

La cantidad de agua del suelo para las raíces y para la evaporación de los suelos desnudos depende de los suministros capilares, es decir, de la textura y de la composición del suelo. La evaporación proveniente de lagos y de embalses se ve influida por el calor acumulado en la masa de agua.

En general, para estimar la evaporación y la evapotranspiración se aplican métodos indirectos, ya sea efectuando mediciones puntuales con un instrumento o medidor, o realizando cálculos a partir de otras variables meteorológicas cuantificadas (OMM, 1997).

10.1.4 **Métodos de medición**

Actualmente, es imposible medir directamente la evaporación o la evapotranspiración proveniente de amplias extensiones naturales de agua o de tierra firme. Sin embargo, se han elaborado diversos métodos indirectos, basados en mediciones puntuales u otros cálculos que dan resultados aceptables.

Los evaporímetros, entre los que se distinguen los atmómetros y las cubetas o los tanques de evaporación, sirven para medir la pérdida de agua en una superficie saturada estándar. Estos instrumentos no permiten medir directamente ni la evaporación de superficies naturales de agua, ni la evapotranspiración real o potencial. Por consiguiente, los valores obtenidos deberán corregirse para obtener estimaciones fiables de la evaporación de los lagos y de la evapotranspiración real y potencial de superficies naturales.

Los evapotranspirómetros (o lisímetros) son recipientes que se instalan bajo la superficie del suelo y se rellenan de tierra en la que pueden cultivarse vegetales. Se trata de dispositivos polivalentes que permiten estudiar diferentes fases del ciclo hidrológico en condiciones naturales. Es posible hacer estimaciones de la evapotranspiración (o de la evaporación en caso de suelo desnudo) midiendo y equilibrando el conjunto de los otros elementos del balance hídrico que intervienen en el recipiente, a saber, la precipitación, el drenaje subterráneo y las variaciones del contenido de agua del volumen de suelo en cuestión. Habitualmente, se elimina la escorrentía de superficie. Se pueden utilizar también los evapotranspirómetros para medir la evaporación o la evapotranspiración potencial del suelo (según esté o no cubierto de vegetación), haciendo que la humedad del suelo corresponda a la capacidad del terreno.

Las estimaciones relativas a embalses o lagos, parcelas o pequeñas cuencas vertientes pueden obtenerse mediante un balance hídrico, un balance energético, un estudio aerodinámico y medios complementarios. Estas últimas técnicas se examinan en la sección 10.5.

Cabe señalar que los diferentes evaporímetros o lisímetros representan tipos de mediciones físicamente diferentes. Los factores de ajuste para obtener, a partir de estas mediciones, estimaciones de la evaporación o de la evapotranspiración reales o potenciales de los lagos son necesariamente diferentes. Por consiguiente, es necesario que estos instrumentos y su modo de exposición se describan también con gran detenimiento y precisión, de tal forma que el usuario comprenda lo mejor posible las condiciones de medición.

Se puede consultar más información sobre todos estos métodos en OMM (2008, volúmenes I y II).

10.2 **ATMÓMETROS**

10.2.1 ***Tipos de instrumentos***

Un atmómetro es un instrumento que mide la pérdida de agua de una superficie porosa mojada. Las superficies mojadas están constituidas o bien por esferas, cilindros o láminas de cerámica porosa, o bien por discos de papel de filtro, todos saturados de agua. En el caso del atmómetro de Livingstone, el elemento evaporante es una esfera de aproximadamente 5 cm de diámetro, conectada con un depósito de agua mediante un tubo de vidrio o de metal; la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie de agua contenida en el depósito mantiene la esfera saturada. El atmómetro de Bellani consiste en un disco de porcelana porosa sujeto en la parte alta por un embudo de cerámica barnizada, donde llega agua procedente de una probeta graduada que sirve a la vez de depósito y de dispositivo de medición. En cuanto al evaporímetro de Piche, su elemento evaporante es un disco de papel de filtro unido a la parte baja de un tubo graduado e invertido, cerrado por un extremo, que contiene agua destinada a humidificar el disco de papel; las medidas sucesivas del volumen de agua que queda en el tubo indican la cantidad de agua perdida por evaporación en un momento dado.

10.2.2 ***Mediciones realizadas mediante atmómetros***

Aunque a menudo se considera que los atmómetros proporcionan una medida relativa de la evaporación de la superficie de las plantas, las indicaciones de los atmómetros no tienen en realidad una relación con la evaporación efectiva de las superficies naturales.

Las lecturas de evaporímetros de Piche, con una exposición a la sombra cuidadosamente uniformizada, se han utilizado con cierto éxito para calcular el factor aerodinámico, multiplicación de una función del viento y el déficit de tensión de saturación del vapor, necesario para estimar la evaporación mediante, por ejemplo, el método de combinación de Penman, tras obtener correlaciones locales entre ellas.

Aunque puede establecerse empíricamente una relación entre la pérdida de agua en los atmómetros y la de una superficie natural, es posible que se obtenga una relación diferente para cada tipo de superficie y para combinaciones climáticas diferentes. Los atmómetros deberían seguir siendo útiles para los estudios a pequeña escala, gracias especialmente a su tamaño reducido, a su bajo costo y a su consumo mínimo de agua. Pueden instalarse redes densas de atmómetros en superficies reducidas para llevar a cabo estudios micrometeorológicos. Por otra parte, no se recomienda que se utilicen estos instrumentos para evaluar los recursos hídricos si se dispone de otros datos.

10.2.3 ***Fuentes de error***

Para que los atmómetros puedan funcionar correctamente, es condición indispensable que sus superficies evaporantes se mantengan limpias. Las superficies sucias afectarán considerablemente la tasa de evaporación, de una forma comparable a la de un depósito de termómetro húmedo en psicrometría.

Además, las diferencias de exposición tienen a menudo un efecto considerable en las mediciones de la evaporación. Esto se aplica sobre todo a la exposición al movimiento del aire alrededor de la superficie evaporante cuando el instrumento está situado a la sombra.

10.3 **EVAPORÍMETROS DE CUBETA Y TANQUES DE EVAPORACIÓN**

Las cubetas y los tanques de evaporación existen en una gran variedad de formas, dimensiones y modos de exposición. Entre los diversos tipos de cubetas y de tanques disponibles, se describen a continuación la cubeta estadounidense de clase A, la cubeta rusa GGI-3000 y el tanque ruso de 20 m². Estos instrumentos se utilizan hoy en día ampliamente como evaporímetros estándar en las redes de observación, y se han estudiado sus características de funcionamiento en diversas condiciones climáticas y en distintas latitudes y altitudes. Los datos de la cubeta que permiten obtener estos instrumentos están en relación estable, aunque compleja y dependiente de la zona climática, con los elementos meteorológicos que rigen la evaporación, en la medida en que se apliquen detenidamente las instrucciones relativas a su instalación y exposición.

Se ha recomendado adoptar el tanque ruso de 20 m² como evaporímetro de referencia internacional.

10.3.1 ***Cubeta estadounidense de clase A***

La cubeta estadounidense de clase A está constituida por un cilindro de 25,4 cm de profundidad y 120,7 cm de diámetro. El fondo de la cubeta se coloca a una altura de 3 a 5 cm por encima del nivel del terreno, sobre un marco de madera que sirve de plataforma. Así pues, el aire puede circular libremente por debajo de la cubeta, el agua que se estanca sobre el terreno en caso de lluvia no toca el fondo de la cubeta y esta puede inspeccionarse sin dificultad. La cubeta propiamente dicha tiene 0,8 mm de espesor y está fabricada con hierro galvanizado, cobre o metal monel, y habitualmente no está pintada. La cubeta se llena de agua hasta 5 cm del borde (lo que se conoce como nivel de referencia).

El nivel del agua se mide mediante un instrumento en forma de gancho, o con un punto fijo de referencia. El instrumento en forma de gancho consiste en una escala móvil y un calibrador dotado de un gancho, cuyo extremo toca la superficie del agua cuando el instrumento está bien ajustado. Un tubo estabilizador, de unos 10 cm de diámetro y 30 cm de profundidad, dotado de un orificio en el fondo, elimina cualquier ondulación que pueda formarse en la cubeta y sirve también de soporte al instrumento en forma de gancho durante las observaciones. La cubeta se llena cuando la escala indica que el nivel de agua ha bajado más de 2,5 cm con respecto al nivel de referencia.

10.3.2 ***Evaporímetro ruso de cubeta GGI-3000***

De forma cilíndrica y con fondo cónico, el evaporímetro ruso de cubeta GGI-3000 tiene una superficie de 3 000 cm² y una profundidad de 60 cm. Se lo entierra dejando su borde a 7,5 cm por encima de la superficie del suelo. En el centro de la cubeta se encuentra un índice en forma de tubo metálico sobre el que se instala una probeta volumétrica para llevar a cabo las observaciones de la evaporación. La probeta está equipada con una válvula que se abre hasta que el agua que contiene esté al mismo nivel que el agua del tanque. Se cierra entonces la válvula y se mide con precisión el volumen de agua que contiene la probeta. Conociendo la dimensión de la probeta, se determina entonces la altura de agua por encima del índice del tubo metálico a partir de ese volumen. Una aguja unida al tubo metálico que actúa de índice muestra la altura a la cual se debería ajustar el nivel de agua de la probeta. Este nivel no debería descender a más de 5 mm por debajo del índice, ni elevarse a más de 10 mm por encima de la punta de la aguja. Habitualmente se instala a un lado de la cubeta GGI-3000 un pluviómetro GGI-3000 cuyo colector tiene una superficie de 3 000 cm².

10.3.3 **Tanque ruso de 20 m²**

De forma cilíndrica y con fondo plano, este tanque tiene una superficie de 20 m², un diámetro de aproximadamente 5 m y una profundidad de 2 m. Construido en láminas de hierro soldadas de 4 a 5 mm de espesor, se entierra dejando que el borde sobrepase 7,5 cm de la superficie del suelo. El interior del tanque y sus superficies externas expuestas al aire están pintados de blanco. El tanque está dotado de un depósito de llenado y de un tubo de estabilización en el que se ha instalado un índice tabular sobre el que se coloca la probeta volumétrica para medir el nivel de agua que contiene el tanque. Dentro del tubo de estabilización, al lado del tubo índice, hay una pequeña varilla que termina en una punta afinada que indica la altura a la que se debe ajustar el nivel del agua. Dicho nivel no debería descender a más de 5 mm por debajo de la punta de la aguja ni elevarse a más de 10 mm. Un tubo lateral de vidrio graduado, fijado al tanque de llenado, indica la cantidad de agua añadida al tanque y da una verificación aproximada de la medición que facilita la probeta.

10.3.4 **Mediciones realizadas mediante cubetas y tanques de evaporación**

La tasa de evaporación a partir de una cubeta o de un tanque se obtiene midiendo la variación del nivel de su superficie de agua libre. Esto puede hacerse mediante los dispositivos descritos anteriormente en el caso de las cubetas de clase A y de las cubetas GGI-3000.

Existen varios tipos de cubetas de evaporación automáticas. El nivel del agua de la cubeta se mantiene constante mediante un dispositivo que permite una aportación de agua suplementaria procedente de un embalse auxiliar o evacuando el agua aportada por las precipitaciones. La cantidad de agua añadida o evacuada queda registrada. En otros tanques o cubetas, el nivel de agua se mide permanentemente mediante un flotador situado en el tubo de estabilización y conectado con un aparato registrador.

Varias técnicas de estimación de la evaporación y de la evapotranspiración a partir de superficies naturales, cuya pérdida de agua se trata de evaluar, están basadas en las mediciones realizadas mediante cubetas de evaporación. Estas mediciones son interesantes porque reflejan, en cualquier caso, el impacto del conjunto de las variables meteorológicas, y porque los datos obtenidos por este medio están disponibles inmediatamente y para cualquier período determinado. Por consiguiente, las cubetas de este tipo se suelen utilizar para obtener información de forma constante sobre la evaporación en el marco de una red de observación.

10.3.5 **Exposición**

Las cubetas y los tanques de evaporación generalmente están expuestos de tres formas diferentes:

- a) Enterrados en el suelo: la mayor parte del tanque está entonces por debajo del nivel del suelo, pero la superficie evaporante está al mismo nivel, o aproximadamente, que la superficie circundante.
- b) Por encima del suelo: la cubeta entera y la superficie evaporante están entonces ligeramente por encima del suelo.
- c) Instalados en plataformas fijas flotantes en lagos o en otras masas de agua.

Las estaciones de medición de la evaporación deberían situarse en un emplazamiento relativamente plano y libre de obstáculos (árboles, edificios, arbustos, refugios para instrumentos, etc.). Cuando estos obstáculos sean pequeños, tendrían que estar alejados a una distancia que sea al menos igual a 5 veces su altura, y a 10 veces su altura si se trata de un grupo de obstáculos. El terreno debería ser lo suficientemente amplio para que las medidas no estén perturbadas por posibles raciones o por los efectos del borde de una zona cultivada o de otro tipo de terreno. Estos efectos pueden abarcar más de 100 m. El terreno debería estar vallado para

proteger los instrumentos e impedir que los animales vayan a beber de la cubeta. Sin embargo, sería preciso que la valla estuviera construida de tal forma que no afecte el régimen de viento sobre la cubeta.

Es importante que la capa del terreno que se ha elegido como emplazamiento de la estación de evaporación se mantenga en un estado lo más cercano posible a su estado natural con respecto a la zona circundante. La hierba, la maleza, etc., deberían cortarse a menudo para que no sobrepasen el borde de las cubetas enterradas (es decir, 7,5 cm). Este límite de 7,5 cm para la altura de la hierba se aplica también a las cubetas de clase A. En ningún caso habría que instalar este tipo de evaporímetro sobre un zócalo de hormigón, sobre asfalto o sobre una capa de grava, ni tampoco debería instalarse a la sombra.

10.3.6 **Fuentes de error**

Los modos de exposición de los tanques de evaporación ofrecen diversas ventajas, pero son también fuentes de errores de medición.

Los tanques instalados sobre el suelo son poco costosos y fáciles de montar y de mantener. El agua que contienen se mantiene más limpia que la de los tanques enterrados, porque corre menos peligro de ensuciarse por salpicones o por la tierra levantada por el viento. Cualquier pérdida por goteo que se produzca después de la instalación puede detectarse y repararse fácilmente. Sin embargo, la cantidad de agua evaporada es mayor que en las cubetas enterradas, principalmente debido a la energía radiante adicional que absorben sus paredes laterales. Pueden eliminarse en parte los efectos perjudiciales de la radiación en las paredes utilizando cubetas cubiertas de aislante, pero esto aumenta el costo, infringiría las instrucciones de construcción estándar y cambiaría la estabilidad de las relaciones mencionadas en la sección 10.3.

Al enterrar la cubeta se eliminan parcialmente los efectos perjudiciales, tales como la radiación en las paredes laterales o los intercambios térmicos entre la cubeta y la atmósfera. Sin embargo, los inconvenientes son:

- a) el agua se ensucia más rápidamente y la cubeta es más difícil de limpiar;
- b) las posibles pérdidas por goteo son más difíciles de detectar y de reparar;
- c) la altura de la vegetación alrededor de la cubeta se convierte en un factor crítico. Además, entre la cubeta enterrada y el suelo se producen intercambios térmicos considerables, cuya amplitud depende de gran número de factores y, especialmente, del tipo de suelo, de su contenido en agua y de la densidad de la capa vegetal.

Las cubetas flotantes dan una aproximación más precisa de la evaporación que ocurre en la superficie de un lago que las cubetas, enterradas o no, instaladas en la orilla, a pesar de que las cubetas flotantes tienen un poder de acumulación térmico diferente del de los lagos. Sin embargo, están influenciadas por el lago en el que se hallan y, por consiguiente, no constituyen un buen indicador de la evaporación que se produce. Las observaciones son sumamente difíciles de realizar, ya que a menudo las salpicaduras falsean los datos. Por último, la instalación y la explotación de estas cubetas son costosas.

Independientemente del modo de exposición, lo más importante es que la cubeta sea de material inoxidable y que esté ensamblada de tal forma que se reduzca al mínimo el peligro de pérdidas por goteo.

Las lluvias intensas y los vientos violentos tienden a hacer que el agua desborde de las cubetas, lo cual puede falsear completamente las mediciones.

El nivel del agua en el evaporímetro es un factor importante. Si contiene demasiada agua, un 10% (o más) de la lluvia que cae puede desbordar fuera de la cubeta, lo cual hace que se sobrestime la evaporación. Si el nivel es demasiado bajo, la tasa de evaporación se subestimarán

(aproximadamente un 2,5% por cada centímetro sobre el nivel de referencia de 5 cm en las regiones templadas), debido a que el borde de la cubeta proyecta demasiada sombra y protege en exceso el agua que contiene. Cuando se deja que el nivel baje demasiado, la superficie del agua se calienta más y aumenta la tasa de evaporación.

Se aconseja que se limiten las fluctuaciones del nivel de agua, o bien por medios automáticos, o bien reajustando el nivel cada vez que se hace una lectura, o también quitando agua cuando el nivel alcanza el límite superior fijado o añadiéndola cuando alcanza el límite inferior.

10.3.7 **Mantenimiento**

Debería llevarse a cabo al menos una vez por mes una inspección, prestando especial atención a la detección de las pérdidas por goteo. Habría que limpiar la cubeta tantas veces como sea necesario para evitar la acumulación de desperdicios, el depósito de sedimentos, así como la formación de espuma y de películas de aceite. Se recomienda verter en el agua de la cubeta una pequeña cantidad de sulfato de cobre o de cualquier otro producto que pueda limitar el crecimiento de algas.

En caso de helada, se debería desprender completamente el hielo que se adhiere a las paredes de la cubeta y medir el nivel de agua mientras el hielo flota. Siempre y cuando se actúe así, el hecho de que una parte del agua esté helada no tiene una gran repercusión sobre el nivel de agua. Si el hielo es demasiado grueso para poder romperlo, debería posponerse la medición hasta que ello sea posible y determinar entonces la evaporación teniendo en cuenta este plazo.

A menudo es necesario proteger la cubeta contra los pájaros y otros animales pequeños, sobre todo en las regiones áridas y tropicales. Para este fin, se puede utilizar:

- a) Repelentes químicos: hay que velar entonces por que estos productos no modifiquen de forma considerable las características del agua que contiene el evaporímetro.
- b) Una malla de alambre fijada sobre la cubeta: este tipo de protección estándar se utiliza corrientemente en diversos lugares; impide que los pájaros y los demás animales beban el agua de la cubeta, pero reduce también las pérdidas por evaporación interceptando una parte de la radiación solar y limitando el movimiento del aire sobre la superficie del agua. Con el objeto de poder evaluar el error relacionado con el efecto de la malla sobre el campo de viento, así como las características térmicas de la cubeta, es aconsejable comparar los valores obtenidos mediante una cubeta protegida con los que se obtienen mediante una cubeta corriente en emplazamientos donde no hay ninguna interferencia. Las pruebas realizadas con una protección cilíndrica, constituida por una malla de acero con celdillas hexagonales de 25 mm, situada en un chasis con barras de acero de 8 mm de diámetro, han indicado una disminución sistemática de un 10% de la tasa de evaporación en tres lugares diferentes durante un período de dos años.

10.4 **EVAPOTRANSPIRÓMETROS (LISÍMETROS)**

En las publicaciones técnicas se describen varios tipos de lisímetros. Se dan detalles sobre determinados instrumentos utilizados en los diversos países en OMM (1966 y 2008 (volumen I)).

En general, un lisímetro consiste en un recipiente interior lleno de una muestra de suelo, y con paredes de retención, o en un recipiente exterior, así como en dispositivos especiales que permiten medir la percolación o las variaciones del contenido en agua del suelo.

A nivel internacional, no existe un lisímetro universal normalizado para medir la evapotranspiración. La superficie de estos instrumentos varía de 0,05 a unos 100 m², y su profundidad lo hace de 0,1 a 5 m. Según el método de funcionamiento, se pueden clasificar en lisímetros de balanza y los que no lo son. Cada uno de estos instrumentos ofrece ventajas e inconvenientes, y la elección del lisímetro depende del problema que se vaya a estudiar.

Los lisímetros de percolación (es decir, los que no son de balanza) solo permiten realizar mediciones a largo plazo, a no ser que sea posible medir el contenido en agua del suelo por otro método independiente y seguro. Se utilizan lisímetros de percolación de gran superficie para estudiar el balance hídrico y la evapotranspiración en el caso de una capa vegetal bien desarrollada en altura y profundamente arraigada (árboles adultos, por ejemplo). Los modelos más pequeños y sencillos, utilizados en el caso de un suelo desnudo o todavía recubierto de hierba o de plantas cultivadas, suelen dar excelentes resultados para las aplicaciones prácticas en condiciones de humedad; son fáciles de instalar, su mantenimiento es poco costoso y, por lo tanto, se integran bien en las redes de observación.

Salvo que se utilice un tipo de microlisímetro simple para medir la evaporación del suelo, los lisímetros de balanza son mucho más costosos. Sin embargo, ofrecen la ventaja de dar estimaciones fiables y precisas de valores a corto plazo de la evapotranspiración, siempre y cuando se hayan tomado las precauciones indispensables en materia de diseño, manejo y elección del emplazamiento.

Se han elaborado varias técnicas de pesaje basadas en diversos principios de mecánica y de hidráulica. Los lisímetros pequeños más sencillos generalmente se levantan de sus zócalos y se instalan en una balanza mecánica mediante grúas móviles. A veces su recipiente se instala de forma permanente en una balanza mecánica con objeto de realizar registros continuos. Se simplifica considerablemente el sistema de pesaje y de registro utilizando celdas de carga equipadas con extensómetros de una resistencia eléctrica variable. Los sistemas hidráulicos de pesaje se basan en el principio de desplazamiento de los fluidos provocado por el empuje de un recipiente flotante (se habla en este caso de lisímetro flotante) o en el principio de variaciones de la presión del líquido que interviene en las celdas de carga hidráulicas.

Se recomienda que se empleen grandes lisímetros de balanza registradores para efectuar mediciones de precisión en los centros de investigación, y para llevar a cabo la normalización y la parametrización de otros sistemas de medición de la evapotranspiración, así como la modelización de este proceso. Los pequeños modelos de lisímetros de balanza resultan útiles y adecuados para las instalaciones de red. En cuanto a la utilización de microlisímetros para medir la evaporación a partir del suelo, este es un fenómeno relativamente nuevo.

10.4.1 ***Mediciones realizadas mediante lisímetros***

En cuanto a los lisímetros, la tasa de evapotranspiración puede estimarse mediante la ecuación general del balance hídrico aplicada a sus recipientes. La evapotranspiración es igual a la precipitación/irrigación, menos la percolación menos la variación del almacenamiento de agua.

Por consiguiente, los programas de observación realizados en parcelas en las que están instalados lisímetros incluyen observaciones de la precipitación, de la irrigación, de la percolación y de la variación del almacenamiento de agua en el suelo. También resulta conveniente completar estos programas con las observaciones del crecimiento y del desarrollo de las plantas.

Es preferible medir la precipitación (y, si procede, la irrigación) al nivel del suelo por métodos normalizados. El agua de percolación se recoge en un tanque y su volumen puede medirse a intervalos regulares o registrarse. Para evaluar con precisión la variación del almacenamiento, se emplean las minuciosas técnicas gravimétricas descritas anteriormente. Cuando se realice el pesaje, convendría proteger el lisímetro de los efectos de la carga ejercida por el viento.

El método volumétrico da buenos resultados cuando se trata de evaluar la evolución a largo plazo de la evapotranspiración; permite medir la cantidad de la precipitación y la magnitud de la percolación. Se toma por hipótesis que la variación del almacenamiento tiende hacia cero durante el período de observación. Además, es posible determinar la variación del contenido en agua del suelo estableciendo una relación entre la humedad del suelo con su propio poder de retención, al principio y al final de ese periodo.

10.4.2 **Exposición**

Las observaciones de la evapotranspiración deberían ser representativas de la capa vegetal y de las condiciones de humedad de los alrededores de la estación en general (OMM, 2010). Para que las tasas de evapotranspiración medidas sean representativas, convendría que el suelo y la capa vegetal del lisímetro sean idénticos a los de la zona circundante y que las perturbaciones provocadas por la presencia de instrumentos se minimicen. A continuación, se indican las principales exigencias en materia de exposición de lisímetros.

Para preservar las propiedades hidromecánicas del suelo, se recomienda instalar un solo bloque (monolítico) en el recipiente. Cuando el suelo es ligero y bastante homogéneo, y el recipiente es de gran tamaño, basta rellenar este último, capa por capa, en el mismo orden y con la misma densidad que en el perfil natural.

Para simular el drenaje natural, hay que velar por que este proceso se realice libremente en el fondo del recipiente. La textura del suelo obliga a veces a utilizar una bomba de vacío para conseguir artificialmente la aspiración necesaria.

Salvo en el caso de los microlisímetros que sirven para medir la evaporación del suelo, los lisímetros deberían ser suficientemente amplios y profundos, y su borde, tan bajo como sea posible para que la capa vegetal pueda crecer libremente y de forma representativa.

En general, la elección del emplazamiento de los lisímetros está sujeta a las mismas exigencias relativas a la superficie expuesta al viento que las cubetas de evaporación (los instrumentos deberían instalarse fuera de la zona de influencia de edificios, árboles aislados, otros instrumentos meteorológicos, etc.). Para reducir al mínimo los efectos de advección, conviene emplazar los lisímetros a una distancia suficiente (es decir, por lo menos a 100 o a 150 m) del borde, viento arriba de la zona circundante. La atenuación de los efectos de advección es particularmente importante cuando se trata de realizar mediciones en la superficie de tierras irrigadas.

10.4.3 **Fuentes de error**

Las mediciones realizadas mediante lisímetros son objeto de diversos errores relacionados con las perturbaciones de las condiciones naturales debidas a los propios instrumentos. Entre las principales fuentes de error, cabe señalar:

- a) el crecimiento limitado del sistema de raíces;
- b) la modificación de la difusión turbulenta que resulta de la discontinuidad en la cubierta forestal entre el interior del lisímetro y la zona circundante (esta discontinuidad puede corresponder al círculo delimitado por el recipiente y las paredes de retención del lisímetro, o puede ser la consecuencia de disparidades en la cubierta forestal propiamente dicha);
- c) el desequilibrio térmico entre el lisímetro y la zona circundante causado por:
 - i) el aislamiento térmico del instrumento con respecto al subsuelo;
 - ii) los efectos térmicos del aire ascendente o descendente que circula entre el recipiente y las paredes de retención;
 - iii) la modificación de las propiedades térmicas del suelo, debida al cambio de su textura y de su contenido en agua;
- d) la equivalencia insuficiente del balance hídrico relativo al instrumento y a la zona circundante, debida a:
 - i) la perturbación de la estructura del suelo;

- ii) el drenaje inadecuado;
- iii) la filtración vertical en las paredes;
- iv) la interrupción de la escorrentía y de los movimientos laterales del agua en el suelo.

Algunas disposiciones permiten reducir los errores de las mediciones obtenidas mediante lisímetros, como el ajuste de la temperatura bajo el recipiente o la instalación de aros de bridas con objeto de disminuir la filtración vertical en las paredes. Si bien es primordial tener que diseñar con gran detenimiento los lisímetros, también es importante conseguir una buena representatividad de las diversas plantas o del suelo utilizados para estudiar la zona en cuestión. Además, el terreno en el que está instalado el lisímetro deberá ser perfectamente representativo del medio natural de los alrededores.

10.4.4 **Mantenimiento**

Se deben tomar ciertas medidas para preservar la representatividad de la capa vegetal que se halla dentro de los lisímetros. Todas las actividades agrícolas o de otro tipo (siembra, fertilización, siega, etc.) deberían realizarse de la misma forma y en el mismo momento en el recipiente y en la zona circundante. Para evitar los errores debidos a anomalías de las precipitaciones, habría que mantener las plantas que se encuentran cerca o dentro del recipiente en posición vertical, y hacer lo necesario para que las hojas y los tallos rotos no vuelvan a caerse en la superficie del lisímetro.

El mantenimiento de los dispositivos técnicos varía en función del tipo de instrumento y no puede describirse aquí.

Se recomienda comprobar, por lo menos una vez al año, que los lisímetros no sufren pérdidas por goteo, cubriendo su superficie para impedir la evapotranspiración y verificando durante un período de unos días si la cantidad de agua drenada es igual a la cantidad de agua añadida en la superficie.

10.5 **ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN A PARTIR DE SUPERFICIES NATURALES**

Al examinar los factores que influyen en la evaporación, tal como se indica en la sección 10.1.3, se observa que la tasa de evaporación a partir de una superficie natural difiere necesariamente de la tasa calculada mediante un evaporímetro expuesto a las mismas condiciones atmosféricas, debido a la disparidad de las propiedades físicas de las dos superficies evaporantes.

En la práctica, las tasas de evaporación y de evapotranspiración en superficies naturales presentan mucho interés, tanto si se trata de la evaporación de los embalses o de los lagos, como de la evaporación en cultivos o incluso de la evaporación de superficie en amplias extensiones, tales como las cuencas fluviales.

Las estimaciones de superficie de la evapotranspiración son especialmente difíciles de obtener en regiones que tienen características de superficie y modos de utilización de los suelos diferentes (OMM, 1966 y 1997).

Los métodos más adecuados para la estimación de la evaporación de los lagos y de los embalses son el balance hídrico, el balance energético, los enfoques aerodinámicos, el método que combina ecuaciones aerodinámicas y ecuaciones del balance energético, así como la utilización de una relación de complementariedad entre la evaporación real y la evaporación potencial. Se dispone además de técnicas de evaporación, a partir de una cubeta, que permiten determinar un coeficiente lago-cubeta. Este coeficiente, que varía según el tipo de cubeta y su modo de exposición, también depende de las condiciones climáticas (véanse OMM, 1985 y 2008 (capítulo 4 del volumen I)).

Se pueden obtener valores puntuales o de superficie de la evapotranspiración, sin limitación de agua, a partir de superficies cubiertas de vegetación, evaluando la evapotranspiración potencial (o evapotranspiración de los cultivos de referencia) mediante los métodos utilizados en el caso de los lagos, después de adaptarlos a las condiciones propias a la capa vegetal. Algunos métodos utilizan, para cada tipo de vegetación (como sería el tipo de cultivo) coeficientes que varían según su fase de desarrollo, así como un valor integrado de la resistencia estomática relativa a esa vegetación en su conjunto.

Para calcular la evaporación de referencia diaria (24 horas) de la vegetación a partir de la temperatura media diaria del aire y de la radiación global total diaria, el Instituto Real de Meteorología de los Países Bajos emplea el procedimiento establecido por G. F. Makkink (Hooghart, 1971), a saber:

Presión de saturación del vapor a la temperatura del aire T :

$$e_s(T) = 6,107 \cdot 10^{7,5 \cdot \frac{T}{237,3+T}} \quad \text{hPa}$$

Pendiente de la curva de la presión de saturación del vapor de agua con respecto a la temperatura T :

$$\Delta(T) = \frac{7,5 \cdot 237,3}{(237,3+T)^2} \cdot \ln(10) \cdot e_s(T) \quad \text{hPa/}^\circ\text{C}$$

Constante psicrométrica:

$$\Delta(T) = 0,646 + 0,0006T \quad \text{hPa/}^\circ\text{C}$$

Calor específico de la evaporación del agua:

$$\lambda(T) = 1\,000 \cdot (2\,501 - 2,38 \cdot T) \quad \text{J/kg}$$

Densidad del agua:

$$\rho = 1\,000 \quad \text{kg/m}^3$$

Radiación global (total en 24 horas):

$$Q \quad \text{J/m}^2$$

Temperatura del aire (promedio de 24 horas):

$$T \quad ^\circ\text{C}$$

Evaporación diaria de referencia de la vegetación¹:

$$E_r = \frac{1000 \cdot 0,65 \cdot \delta(T)}{\{\delta(T) + \gamma(T)\} \cdot \rho \cdot \lambda(T)} \cdot Q \quad \text{mm}$$

Al establecer una relación entre la tasa medida de evapotranspiración real y las estimaciones de la tasa de evapotranspiración potencial, sin limitación de agua, relacionando luego el valor normalizado así obtenido con el contenido en agua del suelo, el déficit hídrico del suelo o el potencial hídrico en la zona de las raíces, es posible obtener coeficientes que permiten calcular la tasa de evapotranspiración real para un suelo con un contenido de agua determinado.

Se consigue estimar más directamente los valores puntuales de la evapotranspiración real a partir del suelo, observando, mediante un muestreo constante, las variaciones del contenido de agua del suelo o midiendo dicha evapotranspiración con una mayor exactitud mediante un lisímetro de balanza. Otros métodos se basan en mediciones de la turbulencia (correlación del flujo turbulento, por ejemplo) o del perfil (métodos de observación en la capa límite y, a dos alturas, método del balance energético basado en la relación de Bowen). Estos métodos son mucho más costosos y exigen instrumentos y sensores especiales para medir la humedad, la velocidad del

¹ La constante 1 000 se aplica para la conversión de metros a milímetros; la constante 0,65 es una constante empírica típica.

viento y la temperatura. Las estimaciones obtenidas, válidas para los tipos de suelo y de cubierta forestal estudiados, pueden utilizarse como valores de referencia independientes, con miras a la elaboración de relaciones empíricas para la modelización de la evapotranspiración.

Las dificultades que plantea la evaluación de la evapotranspiración a nivel de las cuencas fluviales se deben a la disparidad de las características de superficie, que ocasiona una tasa de evapotranspiración variable en el marco de la zona estudiada. Cuando se quieren obtener valores a corto plazo, es indispensable basarse en relaciones empíricas para estimar la evapotranspiración. Si se lleva a cabo un estudio sobre un período de tiempo más largo (con objeto de reducir al mínimo los efectos de almacenamiento), se puede utilizar el método del balance hídrico para evaluar la evapotranspiración de la cuenca (véase OMM, 1971). Para llevar a cabo estimaciones sobre amplias extensiones se puede utilizar el método basado en el balance hídrico de la atmósfera, que permite deducir la tasa de evapotranspiración de superficie de los datos de radiosondeo. En OMM (2008, capítulo 4 del volumen I) se describen estos métodos, las ventajas que ofrecen y sus límites de aplicación.

Es difícil medir la evaporación de una capa de nieve, y los resultados probablemente no sean más exactos que los que se pueden obtener por el cálculo de la evaporación del agua.

Para medir la evaporación de un manto de nieve, en numerosos países se utilizan evaporímetros de polietileno o de plástico incoloro, y las observaciones solo se hacen cuando no nieva.

La evaporación de una capa de nieve se puede estimar utilizando la ecuación de la difusión turbulenta y teniendo en cuenta las observaciones de la humedad del aire y de la velocidad del viento efectuadas en la superficie de la capa de nieve y a uno o dos niveles por encima de dicha capa. Estas estimaciones son más fiables cuando los valores de la evaporación se calculan para períodos de cinco días o más.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Hooghart, J. C. (ed.), 1971: *Evaporation and Weather*. TNO Committee of Hydrological Research, Technical Meeting 44, Proceedings and Information No. 39, TNO. La Haya.
- Organización Meteorológica Mundial, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Technical Note No. 83 (WMO-No. 201, TP. 105). Ginebra.
- , 1971: *Problems of Evaporation Assessment in the Water Balance* (C.E. Hounam). WMO/IHD Report No. 13 (WMO-No. 285). Ginebra.
- , 1973: *Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes* (J.P. Peixoto). WMO/IHD Report No. 20 (WMO-No. 357). Ginebra.
- , 1976: *The CIMO International Evaporimeter Comparisons* (WMO-No. 449). Ginebra.
- , 1977: *Hydrological Application of Atmospheric Vapour-Flux Analyses* (E.M. Rasmusson). Operational Hydrology Report No. 11 (WMO-No. 476). Ginebra.
- , 1985: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. Operational Hydrology Report No. 22 (WMO-No. 635). Ginebra.
- , 1992: *Vocabulario Meteorológico Internacional* (OMM-N° 182). Ginebra.
- , 1997: *Estimation of Areal Evapotranspiration*. Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 56 (WMO/TD-No. 785). Ginebra.
- , 2008: *Guía de prácticas hidrológicas* (OMM-N° 168), volúmenes I y II. Ginebra.
- , 2010: *Manual del Sistema Mundial de Observación* (OMM-N° 544), volumen I. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial/Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2012: *Glosario Hidrológico Internacional* (OMM-N° 385). Ginebra
-