

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 6. MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	199
6.1 Generalidades	199
6.1.1 Definiciones	199
6.1.2 Unidades y escalas	199
6.1.3 Requisitos meteorológicos e hidrológicos	200
6.1.4 Métodos de medición	200
6.1.4.1 Instrumentos	200
6.1.4.2 Medidores de referencia e intercomparaciones	201
6.1.4.3 Documentación	202
6.2 Emplazamiento y exposición	202
6.3 Medidores de precipitación no registradores	203
6.3.1 Medidores ordinarios	203
6.3.1.1 Instrumentos	203
6.3.1.2 Funcionamiento	205
6.3.1.3 Calibración y mantenimiento	205
6.3.2 Medidores totalizadores	206
6.4 Errores y correcciones en los medidores	206
6.5 Medidores de precipitación registradores	210
6.5.1 Medidor de precipitación de pesaje (o de pesada)	210
6.5.1.1 Instrumentos	210
6.5.1.2 Errores y correcciones	211
6.5.1.3 Calibración y mantenimiento	212
6.5.2 Pluviógrafo de cubeta basculante (o de balancín)	212
6.5.2.1 Instrumentos	212
6.5.2.2 Errores y correcciones	213
6.5.2.3 Calibración y mantenimiento	215
6.5.3 Pluviógrafo de flotador	215
6.6 Medición del rocío, de la acumulación de hielo y de la precipitación de niebla	216
6.6.1 Medición del rocío y de la humedad de las hojas	216
6.6.2 Medición de la acumulación de hielo	217
6.6.2.1 Métodos de medición	217
6.6.2.2 Hielo en pavimentos	218
6.6.3 Medición de la precipitación de niebla	219
6.7 Medición de la caída de nieve y de la capa de nieve	220
6.7.1 Espesor de la nieve caída	220
6.7.2 Mediciones directas del espesor de la capa de nieve	221
6.7.3 Mediciones directas del equivalente en agua de la nieve	221
6.7.4 Colchones nivométricos	222
6.7.5 Nivómetros por radioisótopos	223
6.7.6 Radiación gamma natural	223
6.7.7 Nivómetro de rayos cósmicos	224
ANEXO 6.A. EMPLAZAMIENTOS PARA LA INTERCOMPARACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ..	225
ANEXO 6.B. PROCEDIMIENTOS QUE SE SUGIEREN PARA LA CORRECCIÓN DE LAS MEDICIONES DE LA PRECIPITACIÓN	226
ANEXO 6.C. PLUVIÓMETRO ENTERRADO DE REFERENCIA NORMALIZADO	227
ANEXO 6.D. PROCEDIMIENTO NORMALIZADO PARA LA CALIBRACIÓN EN LABORATORIO DE PLUVIÓMETROS DE INTENSIDAD DE LLUVIA POR CAPTACIÓN	229
ANEXO 6.E. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN <i>IN SITU</i> DE PLUVIÓMETROS DE INTENSIDAD DE LLUVIA POR CAPTACIÓN	232
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	234

CAPÍTULO 6. MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

6.1 GENERALIDADES

En este capítulo se describen los métodos conocidos para medir la precipitación en estaciones terrestres.

También se explica la forma de medir la intensidad de la precipitación (en particular, la intensidad de la lluvia) debido al rápido aumento de la necesidad de esas mediciones para la interpretación de la distribución de la precipitación, la modelización del fenómeno pluvial y las previsiones.

En él no se examinan las mediciones con que se trata de definir la estructura y el carácter de la precipitación, o que requieren instrumentos especializados, pues no son observaciones meteorológicas normalizadas (como la distribución del tamaño de las gotas). Las mediciones marinas y por radar se describen en los capítulos 4 y 7 de la parte II, respectivamente, en tanto que las observaciones desde el espacio se tratan en la parte III.

En OMM (1992*a* y 1998) también puede encontrarse información sobre la medición de la precipitación que comprende, en particular, más detalles sobre mediciones de la capa de nieve.

El problema general de la representatividad es particularmente grave en la medición de la precipitación. Las mediciones de la precipitación son especialmente sensibles a la exposición, al viento y a la topografía, y los metadatos que describen las circunstancias de las mediciones tienen especial importancia para los usuarios de los datos.

Los análisis de los datos de precipitación son mucho más fáciles y más fiables si en las redes se utilizan los mismos pluviómetros y los mismos criterios de emplazamiento; debería tenerse muy en cuenta esta consideración a la hora de diseñar las redes.

6.1.1 Definiciones

La precipitación se define como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o del aire y se deposita en el suelo. Dicho término comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la cencellada blanca, la escarcha y la precipitación de la niebla. La cantidad total de precipitación que llega al suelo en determinado período se expresa en términos de profundidad vertical de agua (o equivalente en agua en el caso de formas sólidas) que cubriría una proyección horizontal de la superficie de la Tierra. La caída de nieve o nevada se expresa también como el espesor de nieve reciente que cubre una superficie horizontal plana (véase la sección 6.7).

La intensidad de la precipitación se define como la cantidad de precipitación recogida por unidad de tiempo. Según esta definición, los datos de la intensidad de la precipitación pueden extraerse de la cantidad de precipitación medida con un medidor de precipitación normal. En ese sentido, la intensidad de la precipitación es un parámetro secundario, extraído del parámetro principal, que es la cantidad de precipitación. No obstante, la intensidad de la precipitación también puede medirse directamente (véase la sección 6.1.4.1).

6.1.2 Unidades y escalas

La unidad de precipitación es la profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) o en kilogramos por metro cuadrado (masa/área) para la precipitación líquida. Las cantidades diarias de precipitación deberían leerse con una resolución de 0,2 mm y, de ser posible, con una resolución de 0,1 mm; las cantidades semanales o mensuales deberían leerse con una resolución

de 1 mm (al menos). Las mediciones diarias de la precipitación deberían efectuarse a horas fijas comunes para toda la red (o redes) de interés. La precipitación inferior a 0,1 mm (0,2 mm en Estados Unidos de América) se denomina generalmente traza.

Las mediciones de las nevadas se realizan en unidades de centímetros y decenas, con una resolución de 0,2 cm. La precipitación inferior a 0,2 cm se denomina generalmente traza. La capa de nieve en el suelo se mide habitualmente a diario, en centímetros completos.

La unidad de medida de la intensidad de la lluvia es la profundidad lineal por hora, normalmente en milímetros por hora (mm h^{-1}). Habitualmente, la intensidad de la lluvia se mide o se calcula en intervalos de 1 minuto, debido a la gran variabilidad de la intensidad de un minuto al siguiente.

6.1.3 **Requisitos meteorológicos e hidrológicos**

En el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) se hace una declaración de carácter general sobre los requisitos de incertidumbre, rango y resolución para medir las precipitaciones. Se indica una incertidumbre de medición alcanzable del 5% o 0,1 mm, la que sea mayor, para las cantidades diarias, 1 cm para la profundidad de la nieve, y 5 mm h^{-1} para índices de hasta 100 mm h^{-1} y el 5% para índices superiores a 100 mm h^{-1} para la intensidad de la precipitación *in situ* (todas las incertidumbres con un nivel de confianza del 95%). Además, en lo relativo a la intensidad de la precipitación, en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) se indican los valores de incertidumbre alcanzable en condiciones de flujo constante en laboratorio (5% por encima de 2 mm h^{-1} o el 2% por encima de 10 mm h^{-1}).

Los períodos comunes de observación son cada hora, cada tres horas y a diario, para fines sinópticos, climatológicos e hidrológicos. En algunos casos, como el diseño y la gestión de redes de drenaje urbano, la predicción de crecidas repentinas y la atenuación de sus efectos, las medidas de seguridad en el transporte y, en general, la mayoría de las aplicaciones que precisan datos sobre las lluvias en tiempo real, se requiere una resolución temporal mucho mayor para medir intensidades de lluvia muy elevadas en períodos muy cortos (normalmente, de 1 minuto para la intensidad de la lluvia). En otras aplicaciones se utilizan pluviómetros totalizadores, con intervalos de observación de semanas o meses, o incluso de un año en montañas y desiertos.

6.1.4 **Métodos de medición**

6.1.4.1 **Instrumentos**

El medidor de precipitación (o pluviómetro cuando solo se tienen que medir precipitaciones líquidas) es el instrumento más frecuentemente utilizado para medir la precipitación. Generalmente se usa un recipiente abierto de lados verticales, en forma de cilindro recto, y con un embudo, si su principal finalidad es medir la lluvia. Se emplean varios tamaños y formas de la boca y altura del medidor, según los países, por lo que las mediciones no son estrictamente comparables (OMM, 1989a). Se mide el volumen o el peso de la captación, este último en particular para la precipitación sólida. La boca del medidor puede encontrarse a alguna de las varias alturas establecidas sobre el suelo o al mismo nivel del terreno circundante. La boca ha de estar situada por encima del espesor máximo previsto de la capa de nieve, y a una altura suficiente para evitar verse alcanzada por posibles salpicaduras desde el suelo. Para la medición de la precipitación sólida, la boca se encuentra sobre el suelo y debería estar rodeada de una protección artificial. La elevación más común en más de 100 países varía entre 0,5 m y 1,5 m (OMM, 1989a).

La medición de la precipitación es muy sensible a la exposición, y en particular al viento. La sección 6.2 trata de la exposición, mientras que en la sección 6.4 se examinan con cierta amplitud los errores a los que son propensos los pluviómetros, así como las correcciones que pueden aplicarse.

La intensidad de la lluvia puede extraerse de la medición de la cantidad de precipitación realizada con un medidor registrador (véase la sección 6.5) o bien medirse directamente. Esto

último puede hacerse, por ejemplo, utilizando un pluviómetro para medir el flujo del agua captada, midiendo la acumulación de agua recogida en función del tiempo o utilizando algún principio óptico de medición. Varias técnicas para determinar la cantidad de precipitación se basan en estas mediciones directas de la intensidad integrando la intensidad medida durante un intervalo de tiempo dado.

En este capítulo se describen asimismo otras técnicas especiales para medir diferentes tipos de precipitación (rocío, hielo, etc.) y la capa de nieve. Algunas técnicas nuevas que se están introduciendo en el uso operativo no se describen en este texto, por ejemplo, el pluviómetro óptico, que utiliza la dispersión óptica. Los informes de conferencias periódicas, como los cursillos internacionales sobre medición de la precipitación (Instituto Hidrometeorológico de Eslovaquia e Instituto Federal de Tecnología de Suiza, 1993; OMM, 1989b) y la Conferencia técnica sobre instrumentos y métodos de observación meteorológicos y medioambientales, junto con las intercomparaciones de instrumentos organizadas por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (OMM, 1998) constituyen fuentes útiles de información sobre los nuevos métodos que se están preparando.

Los puntos de medición de las precipitaciones son la fuente fundamental de datos para análisis zonales. Sin embargo, incluso la mejor medición de la precipitación en determinado punto solo es representativa de una zona limitada, cuyo tamaño depende de la extensión del período de acumulación, de la homogeneidad fisiográfica de la región, de la topografía local y de los procesos que intervienen en la producción de precipitaciones. Los radares y, más recientemente, los satélites se utilizan para definir y cuantificar la distribución espacial de la precipitación. En principio, cabe esperar una integración adecuada de las tres fuentes de datos de precipitación zonal en las redes nacionales de precipitaciones (medidores automáticos, radar y satélite) para proporcionar estimaciones zonales de la precipitación lo suficientemente precisas a nivel operativo para una amplia gama de usuarios de datos de precipitaciones.

Pueden utilizarse como detectores meteorológicos instrumentos que detectan la precipitación e identifican su tipo, en lugar de medirla, a los que se hace referencia en el capítulo 14 de la parte I.

6.1.4.2 ***Medidores de referencia e intercomparaciones***

Como medidores de referencia se utilizan varios tipos de aparatos. La principal característica de su diseño permite reducir o controlar el efecto del viento sobre la captación, que es la razón fundamental del diferente comportamiento de los medidores de precipitación. También se eligen para reducir los otros errores de que se trata en la sección 6.4.

Los medidores a nivel del suelo se utilizan como pluviómetros de referencia para medir la precipitación líquida. Al no haber errores inducidos por el viento, generalmente muestran una mayor precipitación que cualquier pluviómetro elevado (OMM, 1984 y 2009). El pluviómetro se coloca en un hoyo, situando la boca al nivel del terreno, y a suficiente distancia del borde más próximo del hoyo para evitar salpicaduras. El hoyo debería estar cubierto por una fuerte red de plástico o de metal contra las salpicaduras, con una abertura central para la boca del pluviómetro. Es imprescindible prever un sistema que permita vaciar el agua del hoyo. En el anexo 6.C pueden encontrarse una descripción y diseños de un pluviómetro enterrado normalizado, y en OMM (2009) y la norma EN 13798:2010 (Comité Europeo de Normalización (CEN), 2010) se ofrecen más detalles.

El medidor de referencia para la precipitación sólida es conocido como referencia de intercomparación de doble cerca. El pluviómetro de Tretyakov, que tiene una forma peculiar de protección para desviar el viento, está rodeado por una doble barrera vertical octogonal. Se presentan diseños y una descripción en Goodison y otros (1989) y en OMM (1985 y 1998).

El anexo 6.A contiene recomendaciones sobre las comparaciones de medidores de precipitación con los medidores de referencia.

6.1.4.3 **Documentación**

La medición de la precipitación es particularmente sensible a la exposición del medidor, por lo que los metadatos sobre las mediciones han de registrarse meticulosamente para establecer un historial completo de la estación y así poder utilizarse en la realización de estudios climáticos o de otro tipo y para garantizar la calidad.

La sección 6.2 se ocupa de la información que es preciso mantener en relación con el emplazamiento, es decir: una descripción detallada del emplazamiento que incluya los ángulos verticales de los obstáculos más importantes en torno al medidor, la configuración de este, la altura de la boca del medidor sobre el suelo y la altura también sobre el suelo del instrumento utilizado para medir la velocidad del viento.

La modificación de las técnicas de observación de la precipitación, sobre todo el uso de un tipo de medidor de precipitación diferente y el cambio de emplazamiento o de altura de instalación, puede originar faltas de homogeneidad temporal en las series cronológicas de la precipitación (véase el capítulo 2 de la parte VI). La utilización de tipos de medidores y de emplazamientos diferentes da lugar a heterogeneidades espaciales. Ello se debe a errores sistemáticos de la medición de las precipitaciones, principalmente a causa del viento. Puesto que las técnicas de ajuste basadas en parámetros estadísticos pueden eliminar las heterogeneidades con respecto a las mediciones de los pluviómetros más cercanos, la corrección de los errores debidos al viento que aparecen en las mediciones de precipitación puede ser una forma de reducir el sesgo de los valores obtenidos.

En las siguientes secciones (en particular la sección 6.4) referidas a los diversos tipos de instrumentos se analizan las correcciones que pueden aplicarse a las mediciones de la precipitación. En esas correcciones hay incertidumbres, por lo que deberían conservarse tanto los registros originales como las fórmulas de corrección.

También deberían documentarse todos los cambios en los métodos de observación.

6.2 **EMPLAZAMIENTO Y EXPOSICIÓN**

En todo método para medir la precipitación debería tratarse de obtener una muestra representativa de la verdadera cantidad caída sobre la zona que se piensa representar con la medición, ya sea a escala sinóptica, mesoescala o microescala. Por tanto, la elección del emplazamiento, y el error sistemático de medición, son importantes. Para un análisis sobre los efectos del emplazamiento, véase Sevruk y Zahlavova (1994).

La ubicación de las estaciones de precipitación en la zona de interés es importante porque el número y el emplazamiento de los medidores determinan el grado en que las mediciones representan la cantidad real de precipitación que cae en la zona. En OMM (1992a) se analiza extensamente la representatividad zonal para la lluvia y la nieve. En OMM (2008) figura una introducción a la literatura sobre el cálculo de la precipitación zonal y las correcciones de topografía.

Los efectos inducidos por el lugar de ubicación sobre el campo de viento en los alrededores pueden motivar excesos o deficiencias locales de la precipitación caída. En general, la distancia de cualquier objeto respecto del medidor no debería ser inferior al doble de su altura por encima de la boca del medidor. Para cada lugar debería estimarse el ángulo vertical medio de los obstáculos así como trazar un plano de la ubicación. Habría que evitar las laderas o los techos de los edificios. Los lugares elegidos para medir la nieve y/o la capa de nieve deberían estar situados, en la medida de lo posible, en puntos protegidos del viento. Los mejores emplazamientos suelen ser con frecuencia los claros de los bosques o de los huertos, entre los árboles, matorrales o arbustos, o en otros sitios en donde haya obstáculos que actúen como eficaces barreras contra el viento de todas las direcciones.

No obstante, es preferible reducir los efectos del viento, y del lugar sobre el mismo, utilizando un pluviómetro al nivel del suelo para captar la precipitación líquida, o bien forzando el flujo de aire para que sea horizontal por encima de la boca del medidor, aplicando las siguientes técnicas que se enumeran por orden decreciente de eficacia:

- a) en zonas con vegetación densa y homogénea, la altura de la vegetación debería mantenerse al mismo nivel que la boca del pluviómetro mediante una poda regular;
- b) en otras zonas, mediante la simulación del efecto citado en a), empleando estructuras de protección adecuadas;
- c) utilizando paravientos alrededor del pluviómetro.

La superficie que rodea al pluviómetro puede estar cubierta de hierba corta, grava o guijarros, pero en todos los casos deberían evitarse las superficies duras y llanas como las de hormigón para impedir las excesivas salpicaduras en el interior del pluviómetro.

Se ha elaborado una clasificación de los emplazamientos de medición, con objeto de cuantificar y documentar la influencia del entorno circundante (véase el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.B) de la presente Guía), en la que se emplea una descripción relativamente sencilla de los emplazamientos (terrestres).

6.3 MEDIDORES DE PRECIPITACIÓN NO REGISTRADORES

6.3.1 Medidores ordinarios

6.3.1.1 Instrumentos

El medidor de precipitación utilizado normalmente consiste en un colector situado por encima de un embudo que da paso a un depósito, donde el agua y la nieve derretida acumuladas se almacenan entre períodos de observación. Se utilizan diversas formas de medidores en diferentes lugares del mundo, tal y como se muestra en la figura 6.1. Cuando la precipitación sólida es frecuente e importante se utilizan varias modificaciones especiales con el fin de mejorar la exactitud de la medición. Esas modificaciones comprenden la supresión del embudo del medidor al comenzar la temporada de nieve o la provisión de un dispositivo especial para impedir el arrastre de la captación (véase OMM, 1998). Los paravientos en torno al medidor reducen el error por la deformación del campo de viento sobre el mismo y por la entrada de nieve. Son aconsejables para la lluvia y esenciales para la nieve. Se utiliza una amplia variedad de medidores (véase OMM, 1989a).

El agua almacenada se recoge en una probeta o se vierte del depósito en una probeta, o bien se mide su nivel en el depósito directamente con una varilla graduada. El tamaño de la boca del colector no es determinante cuando se trata de precipitación líquida, pero se requiere por lo menos un área de 200 cm² si se esperan formas de precipitación sólidas en cantidades significativas. Tal vez lo más conveniente sea un área de 200 a 500 cm². Los requisitos más importantes que ha de reunir un medidor de precipitación son los siguientes:

- a) El reborde de la boca del colector debería ser afilado, con una vertiente interior completamente vertical y la exterior presentando un profundo biselado; los medidores para la nieve deberían estar diseñados de manera que se disminuya al máximo la posibilidad de obturación de la boca por acumulación de nieve húmeda alrededor del reborde.
- b) El área de la boca del medidor debería conocerse con una exactitud del 0,5% y la construcción tendría que permitir que esa área permanezca constante mientras el medidor se utilice normalmente.

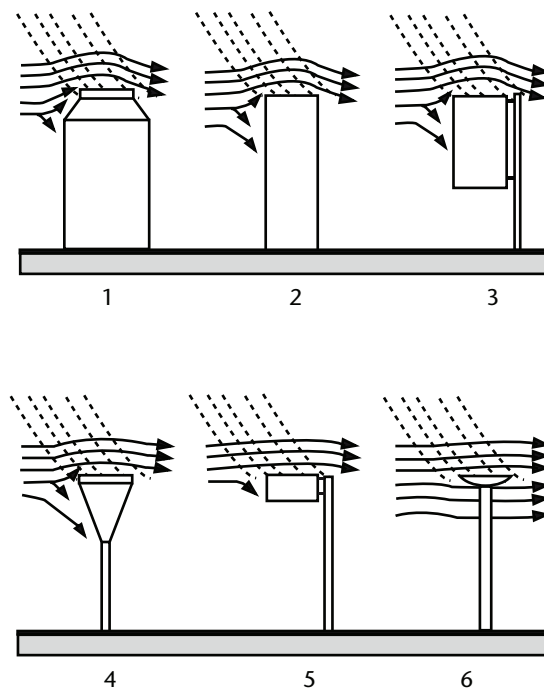


Figura 6.1. Diferentes formas de pluviómetros normalizados. Las líneas continuas muestran las líneas de corriente y las líneas discontinuas hacen lo propio con las trayectorias de las partículas de precipitación. El primer pluviómetro muestra la mayor deformación del campo de viento por encima de la boca del instrumento de medición, y el último pluviómetro muestra la menor. En consecuencia, el error inducido por el viento en el caso del primer pluviómetro es más importante que en el caso del último.

Fuente: Sevruk y Nespor (1994)

- c) El colector debería diseñarse de modo que la lluvia no pudiera salpicar hacia dentro ni hacia fuera. Esto puede lograrse si la pared vertical es bastante profunda, y la pendiente del embudo está suficientemente inclinada (al menos un 45%). Estas condiciones se ilustran en la figura 6.2.
- d) La construcción debería permitir reducir al mínimo los errores por humidificación, lo que puede lograrse eligiendo el material adecuado y reduciendo al mínimo la superficie interna total del colector.
- e) El depósito debería tener una entrada estrecha, suficientemente protegida de la radiación, para reducir al mínimo las pérdidas de agua por evaporación. Los medidores de precipitación que se utilicen en lugares donde solo se hacen lecturas semanales o mensuales tendrían que disponer de un diseño análogo al utilizado para las mediciones diarias, pero con un depósito de mayor capacidad y una construcción más robusta.

La probeta debería ser de vidrio o plástico transparente, con un coeficiente de dilatación térmica adecuado, y estar claramente marcada para indicar el tamaño o tipo de medidor con el que se utilizará. Su diámetro habría de ser inferior al 33% del diámetro del reborde del medidor; cuanto menor sea el diámetro relativo, mayor será la exactitud de la medición. Las graduaciones tendrían que estar grabadas con trazo fino; en general, deberían ser marcas a intervalos de 0,2 mm y líneas claras que correspondan al milímetro entero. También es conveniente marcar la línea que corresponde a 0,1 mm. El error máximo de las graduaciones no debería exceder de $\pm 0,05$ mm para la graduación de 2 mm o más, y de $\pm 0,02$ mm por debajo de esa marca.

Para medir pequeñas cantidades de precipitación con la incertidumbre adecuada, el diámetro interior de la probeta debería ir disminuyendo hacia la base. En todas las mediciones, el fondo del menisco de agua debería definir el nivel del agua, y la probeta tendría que mantenerse en

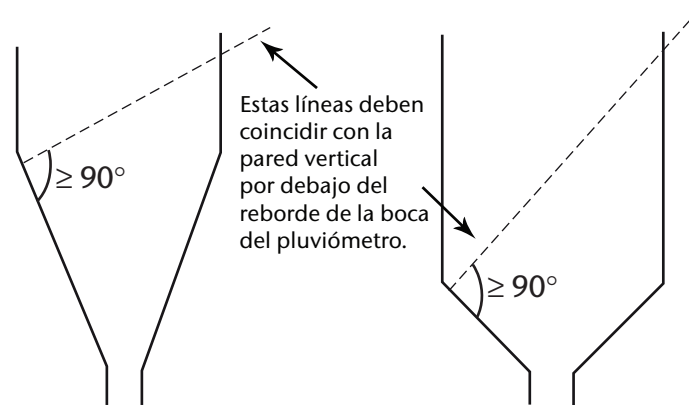


Figura 6.2. Colectores idóneos para pluviómetros

posición vertical durante la lectura para evitar errores de paralaje. La repetición de las líneas principales de graduación en la cara posterior de la probeta ayuda también a reducir estos errores.

Las varillas graduadas deberían ser de madera de cedro o de otro material adecuado que no absorba demasiada agua y solo posea un efecto capilar escaso. Las varillas de madera no resultan adecuadas si se ha añadido aceite al colector para suprimir la evaporación; en este caso se deben utilizar varillas de metal o de otros materiales de los que pueda quitarse fácilmente el aceite. Las varillas no metálicas deberían tener un pie de latón para evitar el desgaste y estar graduadas en función de las áreas relativas de la sección transversal de la boca del pluviómetro y del colector; habría que marcar las graduaciones al menos cada 10 mm, y sería preciso prever el desplazamiento de las marcas causado por el propio material de la varilla. El error máximo de la graduación de la varilla no debería exceder de $\pm 0,5$ mm en cualquier punto. Siempre que fuera posible, la medición con varilla debería verificarse utilizando una medida volumétrica.

6.3.1.2 **Funcionamiento**

La probeta ha de mantenerse vertical cuando se proceda a la lectura, y el observador debería ser consciente de los errores de paralaje. Sería preciso pesar o fundir la nieve recogida en los medidores de precipitación no registradores inmediatamente después de cada observación, y medirla luego utilizando una probeta con graduación normalizada. También se puede medir la precipitación captada pesándola con exactitud, procedimiento que tiene varias ventajas. Se obtiene el peso total del depósito y su contenido, y se resta la tara ya conocida. No hay peligro de que se vierta agua, y cualquier agua adherida al depósito queda incluida en el peso. Sin embargo, los métodos comúnmente utilizados son más sencillos y baratos.

6.3.1.3 **Calibración y mantenimiento**

Sea cual fuere el tamaño del colector elegido, la graduación de la probeta o de la varilla ha de corresponder a él. Por lo tanto, la calibración del medidor comprende la verificación del diámetro de la boca, y hay que asegurarse de que se encuentra dentro de las tolerancias admisibles. También comprende verificaciones volumétricas de la probeta o de la varilla de medición.

El mantenimiento periódico debería comprender, en todo momento, la comprobación de la nivelación del instrumento para evitar el efecto de un medidor sin nivel (véanse Rinehart, 1983; Sevruk, 1984). Según las necesidades, el depósito exterior del medidor y la graduación deberían mantenerse limpios en todo momento por ambos lados, interior y exterior, utilizando un cepillo de mango largo y agua jabonosa, y enjuagarse con agua limpia. Las partes gastadas, dañadas o rotas habría que sustituirlas en caso necesario. La vegetación que rodea al pluviómetro debería mantenerse a una altura de 5 cm (cuando proceda). La exposición debería verificarse y registrarse.

6.3.2 Medidores totalizadores

Los medidores totalizadores se utilizan para medir la precipitación total de cada estación en zonas remotas o poco habitadas. Estos pluviómetros consisten en un colector situado sobre un embudo que da paso a un depósito suficientemente grande para almacenar toda la precipitación captada a lo largo de la estación (o la captación mensual en zonas húmedas). Con objeto de reducir la evaporación se debería poner en el depósito una capa no inferior a 5 mm de un aceite adecuado u otro producto que evite la evaporación (OMM, 1972). Esta capa debería permitir el paso de la precipitación hacia la solución que haya por debajo de ella.

Conviene poner en el depósito una solución anticongelante para convertir al estado líquido toda la nieve que caiga en el interior del medidor. Es importante que la solución anticongelante esté bien distribuida. Una mezcla de un 37,5% en peso de cloruro de calcio comercial (78% de pureza) y un 62,5% de agua constituye una solución anticongelante satisfactoria. También pueden utilizarse soluciones acuosas de glicoletileno o una mezcla de glicoletileno y metanol. Aunque estas últimas soluciones son más caras, resultan menos corrosivas que el cloruro de calcio y protegen contra la congelación en una gama mucho más amplia de las diluciones que tienen lugar como consecuencia de la precipitación subsiguiente. El volumen de la solución que se coloque inicialmente en el depósito no debería exceder del 33% por ciento del volumen total del medidor.

En algunos países, esta solución de anticongelante y aceite se considera desecho tóxico y, por consiguiente, nocivo para el medio ambiente. Deberían recabarse de las autoridades locales para la protección del medio ambiente directrices sobre la eliminación de sustancias tóxicas.

La captación estacional de precipitación se determina pesando o midiendo el volumen del contenido del depósito (como para los medidores normales; véase la sección 6.3.1). La cantidad de aceite y solución anticongelante colocada en el depósito al comienzo de la estación, así como cualquier contracción en caso de medidas volumétricas, deben tenerse muy en cuenta. Se pueden aplicar correcciones, como para los medidores normales.

El funcionamiento y el mantenimiento de los medidores totalizadores en las zonas remotas plantea varios problemas, tales como la posibilidad de que el medidor quede cubierto de nieve o la dificultad de localizar el medidor para registrar la medición, por lo que es necesario llevar a cabo un control específico. Debería prestarse especial atención a la evaluación de la calidad de los datos que provienen de este tipo de medidores.

6.4 ERRORES Y CORRECCIONES EN LOS MEDIDORES

Conviene examinar en esta fase los errores y correcciones que se aplican hasta cierto punto a la mayoría de los medidores de precipitación, tanto a los medidores registradores como a los no registradores. Los casos correspondientes a los medidores registradores se analizan en la sección 6.5.

En OMM (1982, 1984, 1986, concretamente para la nieve, 1998, y, concretamente para la intensidad de la precipitación, 2006 y 2009) se encuentran reseñas completas sobre errores y correcciones. En OMM (1982) se dan detalles de los modelos utilizados actualmente para ajustar los datos brutos de las precipitaciones en Canadá, Dinamarca, Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Finlandia y Suiza. En OMM (1989a) se describe cómo se llegan a producir los errores. En OMM (1986 y 1989b) hay documentos recopilados de conferencias sobre el particular. En OMM (2006 y 2009) se ofrecen detalles sobre cómo mejorar la fiabilidad de las mediciones de la intensidad de la lluvia obtenidas mediante pluviómetros tradicionales de cubeta basculante, de pesada y otros tipos de medidores (ópticos, flotantes/de sifón, etc.).

La cantidad de precipitación medida por los medidores utilizados normalmente puede ser inferior a la precipitación real que llega al suelo en hasta un 30% o más. Las pérdidas sistemáticas varían según el tipo de precipitación (nieve, precipitaciones mixtas de nieve y lluvia, y lluvia).

El error sistemático de la medición de la precipitación sólida es en general grande, y puede alcanzar un orden de magnitud superior a los asociados normalmente a las mediciones de precipitación líquida.

Para numerosos fines hidrológicos es necesario, en primer lugar, ajustar los datos con el fin de corregir este error antes de efectuar cálculos. Por supuesto, los ajustes pueden ser inexactos (e incluso pueden empeorar las cosas). Por consiguiente, los datos originales deberían conservarse siempre como archivo básico, tanto para mantener la continuidad como para servir de base en los futuros ajustes mejorados, cuando sea posible hacerlos.

La evaluación tradicional de los errores de los medidores de la precipitación hace referencia a los denominados errores imputables al estado del tiempo. Se acepta ampliamente que la medición de la precipitación líquida en el suelo se ve afectada por distintas fuentes de errores sistemáticos y aleatorios, principalmente debidos a pérdidas inducidas por el viento, la humedad y la evaporación (véase OMM, 1982) que hacen poco fiable la medición de la lluvia ligera a moderada en ausencia de una calibración exacta. Los errores inducidos por el viento inciden en la intensidad de la lluvia del orden de 20 a 50 mm h⁻¹, habiéndose observado en algunas estaciones de intercomparación en Europa central una incidencia cercana al 5% (OMM, 1984). También se reconoce que los errores de muestreo debidos a la índole discreta de la medición de la lluvia dependen del tamaño de la cubeta (para los pluviómetros de cubeta basculante) y del intervalo de muestreo o el tiempo de respuesta del instrumento, pero no de la intensidad de la precipitación, y pueden evaluarse de forma analítica (Colli y otros, 2013a).

La cantidad verdadera de precipitación puede estimarse corrigiendo algunos de los diversos errores que se enumeran a continuación, si no todos:

- a) error debido a la deformación sistemática del campo de viento por encima de la boca del medidor: normalmente, del 2% al 10% para la lluvia, y del 10% al 50% para la nieve;
- b) error debido a la pérdida por humectación de las paredes interiores del colector;
- c) error debido a la pérdida por humectación en el depósito cuando se vacía: normalmente, del 2% al 15% en el verano y del 1% al 8% en el invierno, para b) y c) conjuntamente;
- d) error debido a la evaporación en el depósito (más importante en los climas cálidos): del 0% al 4%;
- e) error debido a las ventiscas de nieve;
- f) error debido a las salpicaduras hacia dentro y hacia fuera: del 1% al 2%;
- g) errores sistemáticos mecánicos y de muestreo, y errores debidos a efectos dinámicos (es decir, retardos sistemáticos debidos al tiempo de respuesta del instrumento): normalmente, del 5% al 15% para la intensidad de la lluvia, o incluso más para fenómenos de alta intensidad (véase OMM, 2009);
- h) errores aleatorios de observación y de los instrumentos, incluyendo las lecturas incorrectas de los medidores.

Los siete primeros errores son sistemáticos y se han enumerado por orden de importancia general. El error neto debido a las ventiscas de nieve y a las salpicaduras hacia dentro y hacia fuera del agua puede ser negativo o positivo, en tanto que los errores sistemáticos netos debidos al campo de viento y a otros factores son negativos. Como normalmente es difícil cuantificar los errores enumerados como e) y f), el modelo general para ajustar los datos procedentes de la mayoría de los medidores, propuesto originalmente por la OMM (1982) y modificado después por Legates y Willmott (1990), puede representarse de la siguiente forma:

$$P_k = k_r P_{cr} + k_s P_{cs} = k_r (P_{gr} + \Delta P_{1r} + \Delta P_{2r} + \Delta P_{3r} + \Delta P_{4r}) + k_s (P_{gs} + \Delta P_{1s} + \Delta P_{2s} + \Delta P_{3s} + \Delta P_{4s}) \quad (6.1)$$

donde los subíndices r y s se refieren a la precipitación líquida (lluvia) y sólida (nieve), respectivamente; P_k es la cantidad de precipitación ajustada; k (véase la figura 6.3) es el factor

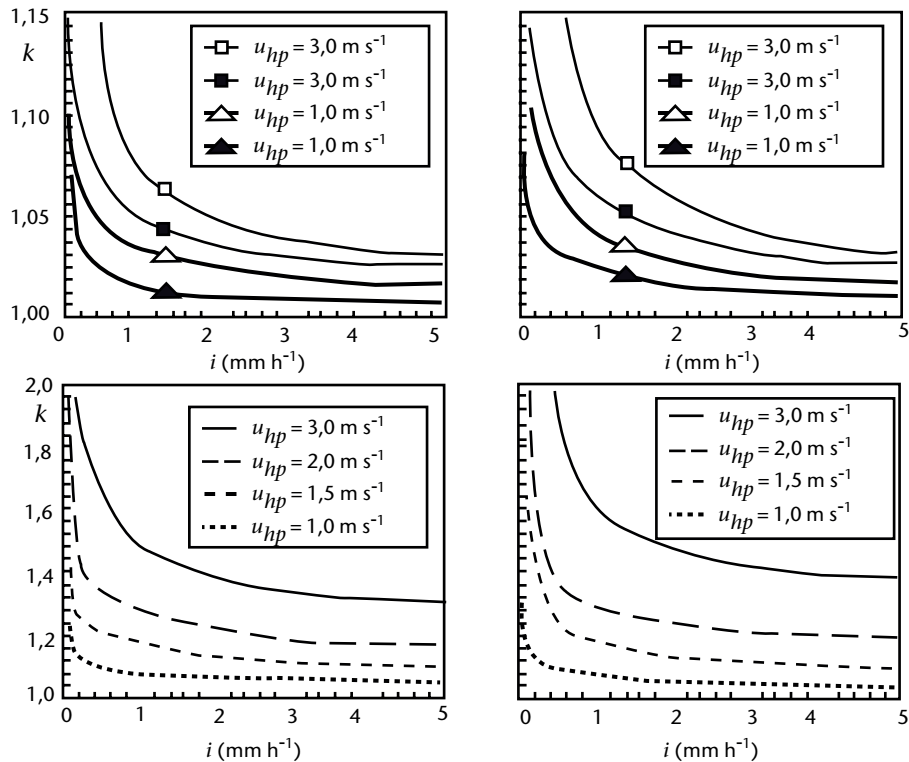


Figura 6.3. Factor de conversión k —definido como el cociente entre la precipitación “correcta” y la medida para la lluvia (arriba) y para la nieve (abajo)—, para dos medidores no protegidos, en función de la velocidad del viento u_{hp} , la intensidad i y el tipo de situación meteorológica, según Nespor y Sevrak (1999). A la izquierda figura el pluviómetro normalizado manual alemán de Hellmann, y a la derecha el pluviómetro registrador de cubeta basculante de Lambrecht. Los cuadrados y triángulos blancos de los diagramas de la parte superior de la figura se refieren a las precipitaciones orográficas y los símbolos con relleno de color negro, a los chaparrones. Hay que tener en cuenta las diferentes escalas para la lluvia y la nieve. En los medidores protegidos, k puede reducirse al 50% y al 70% para la nieve y para la precipitación mixta, respectivamente (OMM, 1998). Las pérdidas de calor no se tienen en cuenta en los diagramas (en Suiza, entre el 10% y el 50% de los valores medidos de nieve fresca varían con la altitud).

de ajuste para corregir los efectos de la deformación del campo de viento; P_c es la cantidad de precipitación captada por el colector del medidor; P_s es la cantidad medida de precipitación en el medidor; ΔP_1 es el ajuste para corregir la pérdida por humectación de las paredes interiores del colector; ΔP_2 es el ajuste para corregir la pérdida por humectación en el depósito después de vaciarlo; ΔP_3 es el ajuste para corregir la evaporación del depósito, y ΔP_4 es el ajuste para corregir los errores mecánicos sistemáticos.

Los errores debidos a las condiciones meteorológicas en el colector, así como los relacionados con la humectación, las salpicaduras y la evaporación, suelen denominarse errores por captación. Indican la capacidad del instrumento para recoger la cantidad exacta de agua según la definición de precipitación en el suelo, es decir, el total de agua que cae sobre la zona de proyección del colector sobre el suelo. Los errores sistemáticos mecánicos y de muestreo, que normalmente se denominan errores de cuantificación, están relacionados con la capacidad del instrumento para detectar correctamente la cantidad de agua recogida por el instrumento. Las intercomparaciones de la OMM en laboratorio e *in situ* de pluviómetros de medición de la intensidad (OMM, 2006 y 2009) contribuyeron a evaluar los errores de cuantificación y documentaron los métodos de calibración en laboratorio e *in situ* para identificar o corregir los errores de cuantificación de las mediciones de la intensidad de la lluvia. Obviamente, esos errores pueden deberse a aspectos muy diferentes de la fase de detección, ya que los instrumentos tal vez difieran en el principio de medición aplicado, los detalles de construcción, las soluciones operativas, etc.

Las correcciones de los errores en la medición de la precipitación se aplican a totales diarios o mensuales y, en algunas prácticas, a episodios de precipitación individuales.

En el caso de las mediciones de la intensidad de la precipitación, los errores sistemáticos mecánicos pueden corregirse adecuadamente mediante una calibración en laboratorio normalizada, denominada calibración dinámica en condiciones de estado estacionario del caudal de referencia (Niemczynowicz, 1986; OMM, 2009). En el anexo 6.D se encontrarán más detalles.

En general, los datos suplementarios requeridos para hacer ajustes relacionados con las condiciones meteorológicas son la velocidad del viento en la boca del medidor durante la precipitación, el tamaño de las gotas, la intensidad de la precipitación, la temperatura y la humedad del aire, y las características del emplazamiento del medidor. Aunque la temperatura pueda afectar en algo al medidor, reduciendo su capacidad de captación, se trata de un efecto considerablemente menos importante que el de la velocidad del viento a la altura del medidor (Yang y otros, 1993; Yang y otros, 1995). La velocidad del viento y el tipo o la intensidad de la precipitación pueden ser variables suficientes para determinar las correcciones. A veces se utiliza la velocidad del viento solamente. En los lugares donde no se realizan estas observaciones se puede recurrir a la interpolación de las observaciones realizadas en emplazamientos adyacentes, con objeto de realizar dichos ajustes, pero ha de procederse con cautela, y únicamente en lo que se refiere a datos mensuales de pluviosidad.

En la mayoría de los medidores de precipitación, la velocidad del viento es el factor ambiental más importante que contribuye a la medición insuficiente de la precipitación sólida. Esos datos deben obtenerse a partir de observaciones meteorológicas normalizadas en el emplazamiento, con el fin de proporcionar ajustes diarios. En particular, si la velocidad del viento no se mide a la altura de la boca del medidor, puede averiguarse mediante un procedimiento de reducción media de la velocidad del viento, conociendo la rugosidad de la superficie y la altura angular de los obstáculos circundantes. En el anexo 6.B¹ se describe el procedimiento propuesto, que depende mucho del lugar, y en el que para hacer la estimación hay que conocer debidamente el emplazamiento de la estación y del medidor. Los medidores protegidos captan más precipitación que los no protegidos, sobre todo en el caso de la precipitación sólida. Por lo tanto, los medidores deberían protegerse naturalmente (por ejemplo, claros de los bosques) o artificialmente (por ejemplo, paravientos Alter, tipo Nipher canadiense, o Tretyakov) a fin de minimizar los efectos adversos de la velocidad del viento sobre las mediciones de la precipitación sólida (para obtener información sobre el diseño de las pantallas protectoras, véase OMM, 1998 y 2008). El tipo de configuración del paraviento, así como el tipo de medidor, alterará la relación entre la velocidad del viento y la eficacia de la captación, e influirá en la homogeneidad de los datos.

La pérdida por humectación (Sevruk, 1974a) es otra pérdida sistemática acumulativa en los medidores manuales que varía según la precipitación y el tipo de aparato; su magnitud depende también del número de veces que se vacía el medidor. La pérdida por humectación media puede llegar hasta 0,2 mm por observación. En estaciones sinópticas donde la precipitación se mide cada 6 horas puede llegar a ser una pérdida muy importante. En algunos países la pérdida por humectación se ha calculado entre el 15% y el 20% de la precipitación medida en invierno. Una alternativa factible es la corrección de la pérdida por humectación en el momento de la observación. Dicha pérdida puede ser reducida con un pluviómetro bien diseñado. La metodología para determinar la pérdida por humectación de los medidores manuales (OMM, 1998) sería suficiente. Se recomienda reexaminar periódicamente (por ejemplo, cada cinco años) la pérdida por humectación de los medidores manuales, ya que tienden a ir cambiando a medida que el colector va envejeciendo. Las superficies internas deberían ser de un material que pueda mantenerse liso y limpio: la pintura, por ejemplo, no resulta adecuada, pero el esmalte al horno es satisfactorio. Deberían reducirse al mínimo las costuras en la construcción.

Las pérdidas por evaporación (Sevruk, 1974b) varían según el tipo de medidor, la zona climática y la época del año. La pérdida por evaporación constituye un problema en los medidores que

¹ Procedimiento para la reducción del viento recomendado por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su undécima reunión (1994).

no tienen en la cubeta un embudo, especialmente a finales de primavera en las latitudes medias. Se han comunicado pérdidas superiores a 0,8 mm por día. En invierno las pérdidas son mucho menores en comparación con los meses de verano, variando entre 0,1 y 0,2 mm por día. Sin embargo, estas pérdidas son acumulativas. En un medidor bien diseñado solo se expone una pequeña superficie de agua, su ventilación se reduce al mínimo, y la temperatura del agua se mantiene baja gracias a una superficie exterior reflectiva. En los medidores registradores de almacenamiento y acumulación, prácticamente se pueden eliminar los errores asociados a la evaporación mediante el uso de aceite en el colector.

Es evidente que para lograr la compatibilidad de los datos, cuando se utilizan diferentes tipos de medidores y de protección en todas las condiciones meteorológicas, resulta imperioso efectuar las correcciones de las mediciones reales. En todos los casos en que se ajustan las mediciones de la precipitación para reducir los errores, se recomienda firmemente que se publiquen los valores medidos y también los ajustados.

6.5 MEDIDORES DE PRECIPITACIÓN REGISTRADORES

El registro automático de la precipitación tiene las ventajas de que puede proporcionar una mejor resolución temporal que las mediciones manuales y de que es posible reducir las pérdidas por evaporación y por humectación. Naturalmente, está sometido a los efectos del viento de que se trata en la sección 6.4.

Por lo general se utilizan tres tipos de medidores de precipitación registradores: el de pesaje (o de pesada), el de cubeta basculante (o de balancín), y el de flotador. Solamente el medidor de pesaje resulta satisfactorio para medir todo tipo de precipitación; el uso de los otros dos se limita en gran parte a la medición de la cantidad de lluvia. Existen nuevos tipos de medidores registradores automáticos que miden la precipitación sin partes móviles utilizando dispositivos tales como sondas de capacitancia, transductores de presión, dispositivos ópticos o pequeños dispositivos de radar, capaces de proporcionar una señal electrónica que es proporcional al equivalente de la precipitación. El dispositivo de reloj que cronometra los intervalos y fecha el registro de tiempo es un componente muy importante del registrador.

Debido a la alta variabilidad de la intensidad de la precipitación en períodos de 1 minuto, un valor único de intensidad de lluvia en períodos de 1 minuto no es representativo de un período de tiempo más largo. Por tanto, la intensidad de la lluvia en períodos de 1 minuto no debería utilizarse con metodologías de muestreo temporal, como una medición sinóptica cada hora o cada 3 horas. Se necesita una sincronización temporal muy buena, superior a 10 segundos, entre el tiempo de referencia y los diferentes instrumentos de la estación de observación.

6.5.1 Medidor de precipitación de pesaje (o de pesada)

6.5.1.1 Instrumentos

En estos instrumentos, el peso de un depósito y la precipitación acumulada en él se registran continuamente, bien por medio de un mecanismo dotado de un muelle, bien con un sistema de balanza de pesas. Se registra, pues, toda la precipitación, ya sea líquida o sólida, a medida que cae. Este tipo de medidor normalmente no tiene mecanismo alguno para vaciarse por sí solo; la capacidad (es decir, la acumulación máxima entre recargas) varía de 250 a 1 500 mm, según el modelo. Debería evitarse el uso de modelos de baja capacidad en zonas donde podría registrarse la acumulación máxima en breves períodos de tiempo. Los medidores registradores deben mantenerse para reducir al mínimo las pérdidas por evaporación, operación que puede realizarse añadiendo suficiente aceite u otro inhibidor de la evaporación en el depósito para que forme una película por encima de la superficie del agua. Cualquier dificultad que se plantee como consecuencia de la oscilación de la balanza debida a fuertes vientos puede reducirse mediante la adecuada programación por un microprocesador para eliminar este efecto en las lecturas. Los medidores de pesaje son especialmente útiles para registrar la nieve, el granizo y las precipitaciones mixtas de nieve y lluvia, debido a que la precipitación sólida no requiere fusión

para poder registrarla. Para el funcionamiento en invierno, el depósito de captación se carga con una solución de anticongelante (véase la sección 6.3.2), con el fin de disolver los contenidos sólidos. La cantidad de anticongelante depende de la cantidad prevista de precipitación y de la temperatura mínima prevista en el momento de la dilución mínima. Estos instrumentos no utilizan partes mecánicas móviles en los mecanismos de pesaje; solamente se produce una deformación elástica. Por tanto, la degradación mecánica y la necesidad consiguiente de mantenimiento se reducen significativamente.

En general, la señal de salida digitalizada se promedia y se filtra. También puede calcularse la intensidad de la precipitación mediante las diferencias entre dos o más mediciones consecutivas del peso. La exactitud de estos tipos de medidores está directamente relacionada con sus características de medición y/o de registro, que pueden variar según los fabricantes.

Los datos proporcionados por muchos instrumentos contienen parámetros de diagnóstico que resultan muy útiles para la evaluación posterior de los datos medidos y para el control de la calidad de los datos.

6.5.1.2 **Errores y correcciones**

Salvo el error debido a la pérdida por humectación en el depósito cuando se vacía, los medidores registradores de pesaje están expuestos a todas las demás fuentes de error analizadas en la sección 6.4. Asimismo, debería señalarse que no es posible identificar el tipo de precipitación con los medidores registradores automáticos solamente. Un importante problema con este tipo de medidores es que la precipitación, particularmente la lluvia engelante o la nieve húmeda, puede adherirse al interior de la boca del pluviómetro y no caer en la cubeta hasta después. Esto limita considerablemente la capacidad de los medidores registradores de pesaje para indicar el momento preciso de los fenómenos de precipitación. Otro fallo común de los medidores de pesaje es la acción del viento, sobre todo en el caso de vientos fuertes, cuando las turbulentas corrientes de aire pasan a través del depósito de captación y causan oscilaciones en el mecanismo de pesaje. Los errores asociados a esos registros anómalos pueden minimizarse promediando las lecturas a breves intervalos, normalmente de entre 1 y 5 minutos. Puede que, a causa del mal funcionamiento del reloj del instrumento, el período o la fecha en que se asignen las captaciones sean incorrectos. Algunos medidores registradores de pesaje también pueden experimentar cierta sensibilidad a la temperatura en el mecanismo de pesaje que añade a los datos registrados un componente proporcional al ciclo de temperatura diurna.

Algunos errores potenciales de los métodos manuales para medir la precipitación pueden eliminarse o al menos minimizarse mediante medidores registradores de pesaje. Los errores aleatorios de la medición unidos al error del observador humano y a ciertos errores sistemáticos, particularmente la pérdida por evaporación y por humectación, se reducen al mínimo. En algunos países, a las observaciones de trazas se les fija oficialmente un valor de cero, lo que da como resultado una subestimación errónea del total de precipitación de la estación. Este problema se minimiza con los medidores de pesaje, puesto que con el tiempo se acumularán incluso pequeñas cantidades de precipitación.

Una característica fundamental de los medidores registradores de pesaje al medir la intensidad de la precipitación es el tiempo de respuesta (incluido el proceso de filtrado), que origina errores de medición (retardo sistemático). Los tiempos de respuesta, indicados en los manuales de uso o evaluados durante una comparación previa de la OMM (OMM, 2009), se sitúan en un rango de entre 6 segundos y unos minutos, según el diseño y el modelo del medidor. La resolución de la intensidad de la precipitación en intervalos de 1 minuto de los medidores registradores de pesaje puede diferir enormemente de un modelo a otro y depende de la resolución del transductor. También es posible que esos medidores muestren un límite o umbral de discriminación para la intensidad de la precipitación.

La corrección de los datos de medidores de pesaje sobre una base horaria o diaria puede resultar más difícil que en períodos más largos, como en el caso de los resúmenes climatológicos mensuales. A la hora de interpretar y corregir con precisión las mediciones de precipitación

realizadas con medidores automáticos serán útiles los datos auxiliares procedentes de estaciones meteorológicas automáticas, como el viento a la altura del medidor, la temperatura del aire, el tiempo presente o el espesor de la nieve.

6.5.1.3 **Calibración y mantenimiento**

Los medidores registradores de pesaje tienen normalmente pocas partes móviles y, por lo tanto, raramente hay que calibrarlos. En general, para la calibración hay que utilizar una serie de pesas que, cuando se colocan en la cubeta o en el depósito de captación, proporcionan un valor predeterminado equivalente a una cantidad de precipitación. Las calibraciones deberían llevarse a cabo normalmente en un entorno de laboratorio y siguiendo las instrucciones del fabricante.

En el anexo 6.D se explica un procedimiento alternativo para calibrar los medidores registradores de pesaje al realizar mediciones de la intensidad de la precipitación. Esta calibración, denominada calibración dinámica en condiciones de estado estacionario del caudal de referencia, se lleva a cabo para evaluar los errores en la medición del medidor de pesaje. El procedimiento también puede servir para evaluar la respuesta dinámica del medidor de pesaje mediante la clásica prueba de respuesta por grado de intensidad, es decir, introduciendo en el instrumento un caudal de referencia que muestre un único cambio abrupto desde cero hasta un valor equivalente a una intensidad de lluvia dada. Es más, mediante la repetición de la calibración dinámica en condiciones no estacionarias (intensidades de referencia variables en el tiempo como simulación de fenómenos reales) se puede ajustar la calibración de los medidores de pesaje (especialmente para los retardos sistemáticos debidos al tiempo de respuesta del instrumento), lo que podría mejorar los resultados dinámicos y la exactitud con fenómenos reales (Colli y otros, 2013b).

El mantenimiento de rutina debería efectuarse cada tres o cuatro meses, según las condiciones de la precipitación en el lugar. Habría que inspeccionar el exterior y el interior del medidor para ver si se ha soltado o roto alguna pieza y para asegurarse de que el instrumento está nivelado. Toda lectura manual debería comprobarse con el registro de datos extraíble para garantizar la coherencia antes de retirar y anotar el registro. La cubeta o el depósito de captación deberían vaciarse, inspeccionarse, limpiarse, en caso necesario, y recargarse con aceite solamente para la operación de precipitación líquida, o con anticongelante y aceite si se prevé precipitación sólida (véase la sección 6.3.2). El dispositivo de registro se tendría que poner a cero para aprovechar al máximo el rango del medidor. En caso necesario, habría que verificar y reemplazar la memoria digital, así como el suministro energético. Se deberán verificar los intervalos de tiempo y las fechas de los registros.

El mantenimiento y las comprobaciones de rutina deberían incluir una calibración adecuada *in situ*, así como la comprobación de la calibración *in situ* o la inspección en el emplazamiento de manera periódica, teniendo en cuenta las limitaciones operativas y del emplazamiento. En el anexo 6.E puede consultarse un procedimiento recomendado para los medidores de intensidad de la lluvia, mediante un dispositivo portátil para la intensidad de referencia.

6.5.2 **Pluviógrafo de cubeta basculante (o de balancín)**

El pluviógrafo de cubeta basculante (también llamado de balancín) se utiliza para medir la intensidad de lluvia, así como los totales acumulados. Deberían aplicarse correcciones adecuadas según la intensidad (véase la sección 6.5.2.2) a fin de mejorar la exactitud de las mediciones de la intensidad y prevenir que se subestime la intensidad de lluvias copiosas y se sobreestime la de lluvias ligeras, ambas situaciones típicas de pluviógrafos de cubeta basculante no corregidos.

6.5.2.1 **Instrumentos**

El principio en el que se basa el funcionamiento de este instrumento es muy sencillo. Un pluviógrafo de cubeta basculante utiliza un depósito con dos compartimentos gemelos de metal o plástico para medir el agua entrante en partes del mismo peso. Cuando un compartimento

se llena, el centro de la masa se desplaza del eje y se produce un movimiento de basculación, con lo que se vacía el agua recogida y el segundo compartimento se coloca en la posición de captación. Debido a la forma de los compartimentos del depósito, el agua se vacía desde el que esté más bajo. La masa de agua que contiene la cubeta es constante (m [g]). Por tanto, mediante la densidad de agua ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$), se calcula el volumen correspondiente (V [cm^3]) al peso del agua, lo que permite obtener la altura de acumulación correspondiente (h [mm]) utilizando la superficie del colector (S [cm^2]). La ecuación es la siguiente:

$$V = m/\rho = h \cdot S \quad (6.2)$$

Así, tomando la densidad de agua, se calcula h , donde 1 mm corresponde a 1 g de agua en una superficie de 10 cm^2 . Para contar con registros detallados de la precipitación, la cantidad de lluvia no debería ser superior a 0,2 mm. En un pluviógrafo con una superficie de $1\,000 \text{ cm}^2$, esto corresponde a 20 g de agua en la cubeta.

La señal de salida bruta se obtiene con un cierre de contacto (interruptor de lengüeta o contacto de relé), de modo que cada vez que se produce un movimiento de basculación se genera un impulso eléctrico como señal de salida que debe quedar registrado por un registrador de datos o un convertidor analógico a digital (sistema de adquisición de datos equipado con puertos de lectura de interruptor de lengüeta). Este mecanismo proporciona una medición ininterrumpida sin interacción manual.

La intensidad de la lluvia de los pluviógrafos de cubeta basculante sin corrección se calcula según la cantidad de movimientos de basculación en un intervalo de muestreo periódico (normalmente 6 o 10 segundos) y se promedia para un intervalo de tiempo seleccionado (por ejemplo, 1 minuto). De esa forma, cada minuto se obtiene un valor de intensidad que representa la intensidad del minuto o los minutos transcurridos. Este sistema de muestreo reduce la incertidumbre del promedio. Además, la resolución de la intensidad de la lluvia depende del tamaño de la cubeta y del intervalo de tiempo elegido. Por ejemplo, un valor de basculación equivalente a 0,2 mm da lugar a una resolución de la intensidad de lluvia en intervalos de 1 minuto de 12 mm h^{-1} que es constante en el rango de medición del pluviómetro si no se aplican correcciones dependientes de la intensidad.

Se requiere poco tiempo, aunque sí una cantidad finita del mismo, para que el recipiente se incline, y durante la primera mitad del movimiento puede entrar más agua en el compartimento que ya contiene la cantidad calculada de lluvia. La pérdida de agua durante el movimiento de basculación indica un error mecánico sistemático que depende más bien de la intensidad propiamente dicha y puede ser apreciable con lluvia fuerte ($> 100 \text{ mm h}^{-1}$). Sin embargo, es posible corregirlo mediante un procedimiento de calibración como el indicado en el anexo 6.D y la aplicación de una curva o algoritmo de corrección (véase la sección 6.4). Un método alternativo sencillo consiste en utilizar un dispositivo como un sifón al pie del embudo para dirigir el agua hacia los recipientes a un ritmo controlado. De esa manera se igualan las intensidades máximas de lluvia durante un período muy breve. También puede agregarse un dispositivo para acelerar el movimiento del recipiente; fundamentalmente, puede consistir en una pequeña lámina que, al recibir el impacto del agua que cae desde el colector, añade fuerza —que varía con la intensidad de la lluvia— al proceso de basculación del recipiente.

El pluviógrafo de cubeta basculante es particularmente adecuado para las estaciones meteorológicas automáticas, porque se presta a los métodos digitales. El impulso generado por un cierre de contacto puede controlarse mediante un registrador de datos, preferiblemente con la hora a la que se producen los movimientos de basculación, a fin de calcular la intensidad de lluvia corregida, que podrá utilizarse a continuación para obtener la cantidad de precipitación en períodos seleccionados. También puede utilizarse con un registrador de bandas de papel.

6.5.2.2 Errores y correcciones

Las fuentes de error del pluviógrafo de cubeta basculante difieren en cierto modo de las de otros medidores registradores, por lo que se aconsejan precauciones y correcciones especiales. Algunas de las fuentes de error son las siguientes:

- a) La pérdida de agua durante la inclinación con fuerte lluvia; esta puede reducirse considerablemente realizando una calibración dinámica (véase el anexo 6.D) y aplicando una corrección según la intensidad.
- b) Con el diseño habitual del recipiente, la superficie de agua expuesta es grande en relación con su volumen, por lo que se pueden producir pérdidas por evaporación apreciables, especialmente en regiones cálidas. Este error puede ser importante cuando la lluvia es débil.
- c) La naturaleza discontinua del registro puede producir datos insatisfactorios con llovizna débil o incluso lluvia muy débil y, en particular, no es posible determinar con exactitud la hora del comienzo o del fin de la precipitación.
- d) El agua puede adherirse a las paredes y al borde del recipiente, con lo que se produce un residuo de lluvia en el mismo y un peso adicional que ha de superarse mediante la acción de inclinación. Las pruebas con recipientes encerados dan una reducción del 4% del volumen requerido para el efecto basculante, con respecto a los no encerados. La calibración volumétrica puede cambiar, sin ajustar los tornillos de calibración, al variar la humectabilidad a través de la oxidación en superficie o la contaminación por las impurezas y variaciones en la tensión superficial.
- e) El chorro de agua que cae del embudo en el recipiente expuesto puede dar lugar a una lectura excesiva según el tamaño, la forma y la posición de la boca.
- f) El instrumento es particularmente propenso a la fricción y a una basculación inadecuada del recipiente cuando el pluviógrafo no está nivelado.
- g) La limitada repetibilidad en diversas intensidades de lluvia del intervalo de tiempo entre movimientos de basculación debida a la baja estabilidad del mecanismo de los compartimentos (es decir, el movimiento de la cubeta) degrada las mediciones; este efecto mecánico sistemático puede investigarse mediante pruebas específicas en las que se registra una serie de intervalos de tiempo entre basculaciones y que permiten estimar la precisión mecánica de la cubeta (véase Colli y otros, 2013b); esos errores pueden reducirse mejorando la calidad de construcción de los medidores.
- h) Los errores de muestreo de los pluviógrafos de cubeta basculante (Habib y otros, 2001) tienen grandes consecuencias adicionales sobre los resultados *in situ* en regímenes de precipitación ligera; estos errores consisten en el retardo del mecanismo de cubeta basculante al asignar la cantidad de agua recogida al intervalo de tiempo correspondiente; existen distintas técnicas de cálculo para reducir el impacto de los errores de muestreo y aportar mediciones de la intensidad de lluvia de una resolución superior a la permitida por la sensibilidad de los pluviógrafos de cubeta basculante (véase Colli y otros, 2013a).

Mediante una calibración cuidadosa pueden hacerse correcciones de las partes sistemáticas de esos errores. La corrección eficaz para mejorar la medición de la intensidad de la lluvia (OMM, 2009) y, por consiguiente, de la cantidad acumulada correspondiente, consiste en llevar a cabo una calibración dinámica y usar curvas de corrección (véase la sección 6.4), por ejemplo, aplicando una corrección mediante un programa informático o un algoritmo en el sistema de adquisición de datos. Como alternativa, se puede realizar un procedimiento de linealización en el circuito electrónico del instrumento (generando una emisión de impulsos adicionales según la intensidad) o mediante un mecanismo (por ejemplo, pequeños deflectores que inducen una presión dinámica de intensidad creciente, por lo que el movimiento de balanceo sucede antes de que la cubeta esté llena). En OMM (2009) se muestra que la linealización por impulsos electrónicos adicionales es adecuada para medir la cantidad de precipitación, pero no tanto para medir la intensidad. Por otra parte, la linealización mecánica compensa la pérdida de agua durante el movimiento de balanceo y reduce enormemente la subestimación de la intensidad durante fenómenos de mucha intensidad. La corrección mediante UN programa informático (curva o algoritmo de corrección) resultó ser el método más eficaz para corregir errores mecánicos sistemáticos.

Las mediciones de los pluviómetros de cubeta basculante pueden corregirse con respecto a los efectos de exposición de la misma forma que en otros tipos de medidores de precipitación.

Durante la estación fría pueden utilizarse dispositivos calefactores que permitan efectuar las mediciones, sobre todo de precipitación sólida. Sin embargo, se ha observado que el rendimiento de los pluviómetros de cubeta basculante calentados es muy deficiente debido a la aparición de grandes errores originados por el viento y por la evaporación de nieve fundida, por lo que esos pluviómetros no se recomiendan para medir la precipitación en invierno en regiones donde las temperaturas son inferiores a 0 °C durante prolongados períodos de tiempo.

6.5.2.3 **Calibración y mantenimiento**

La calibración del pluviómetro de cubeta basculante se realiza normalmente pasando una cantidad conocida de agua a través del mecanismo de inclinación a diversas velocidades, y ajustando el mecanismo al volumen conocido. Ese procedimiento debería realizarse en condiciones de laboratorio. En el anexo 6.D se facilita información sobre los procedimientos de calibración recomendados para este tipo de medidores.

El mantenimiento y las comprobaciones de rutina deberían incluir una calibración adecuada *in situ*, así como la comprobación de la calibración *in situ* o la inspección en el emplazamiento de manera periódica, teniendo en cuenta las limitaciones operativas y del emplazamiento. En el anexo 6.E puede consultarse un procedimiento recomendado para los medidores de intensidad de la lluvia, mediante un dispositivo portátil para la intensidad de referencia.

En razón de las numerosas fuentes de error, las características de captación y la calibración de los pluviómetros de cubeta basculante constituyen una interacción compleja de muchas variables. Las comparaciones diarias con el pluviómetro normalizado pueden proporcionar factores útiles de corrección, y representan una buena práctica. Los factores de corrección pueden variar de una estación a otra y, en general, son mayores que 1,0 (sublectura) en el caso de lluvia de poca intensidad, y menores que 1,0 (sobrelectura) en el de lluvia muy intensa. La relación entre el factor de corrección y la intensidad no es lineal, sino que forma una curva.

El mantenimiento de rutina debería comprender la limpieza de la suciedad y de los residuos que se hayan acumulado en el embudo y en los recipientes, y asegurarse de que el pluviómetro esté nivelado. Se recomienda encarecidamente sustituir una vez al año el mecanismo de inclinación por otro recién calibrado. Se deben verificar los intervalos de tiempo y las fechas de los registros.

6.5.3 **Pluviómetro de flotador**

En este tipo de instrumento la lluvia pasa a un recipiente que es, en realidad, una cámara que contiene un ligero flotador. A medida que el nivel del agua de la cámara aumenta, el movimiento vertical del flotador se transmite, mediante un mecanismo adecuado, al movimiento de una plumilla que se desliza sobre una banda o a un transductor digital. Ajustando debidamente las dimensiones de la boca del colector, el flotador y la cámara, se puede utilizar cualquier escala para la banda de registro.

A fin de poder registrar la precipitación caída durante un período adecuado (en general, de 24 horas), la cámara del flotador ha de ser muy grande (en cuyo caso se obtiene, sobre la banda de registro, una escala comprimida), o bien hay que recurrir a un mecanismo que realice automáticamente y con rapidez el vaciado de la cámara del flotador cada vez que se llene, de modo que la plumilla u otro indicador regrese a la posición del cero en la banda. Habitualmente se recurre a un sifón. El proceso de funcionamiento del sifón debería comenzar precisamente en el nivel predeterminado, y sin tendencia a que el agua rebose o produzca goteos ni al principio ni al fin del período de funcionamiento del sifón, que no debería prolongarse más de 15 segundos. En algunos instrumentos, la cámara del flotador está montada sobre cuchillas que actúan de fulcro, de modo que cuando la cámara está llena se desequilibra; el ascenso del nivel del agua ayuda a que empiece a actuar el sifón, y cuando la cámara está vacía vuelve a su posición original. Otros pluviómetros están dotados de un sifón forzado que actúa en menos

de 5 segundos. Un tipo de esos sifones tiene una pequeña cámara, separada de la principal, en la que se deposita la lluvia que cae mientras actúa el sifón. Esta cámara se vacía en la principal cuando el sifón deja de actuar, garantizando así un correcto registro de la cantidad total de lluvia.

Si existe la posibilidad de que el agua de la cámara del flotador se congele durante el invierno, debería instalarse un sistema de calefacción (preferentemente controlado por un termostato) dentro del pluviógrafo. Esto impedirá daños en el flotador y en su cámara, y permitirá registrar la lluvia durante ese período. Un pequeño elemento calefactor o una lámpara eléctrica resultan adecuados cuando existe una red eléctrica; de no ser así, se pueden utilizar otras fuentes de energía. Un método práctico consiste en utilizar una pequeña resistencia arrollada a la cámara colectora, conectada con una batería de gran capacidad. La cantidad de calor suministrado debería reducirse al mínimo necesario para impedir la congelación, porque el calor puede disminuir la exactitud de las observaciones estimulando los movimientos verticales de aire por encima del pluviógrafo e incrementando además las pérdidas por evaporación.

Se ha señalado que en algunos países la captación por medidores calentados sin protección es totalmente insuficiente, a causa del viento y de la evaporación de nieve fundida, como en el caso de los medidores de pesaje (véase la sección 6.5.1.2).

El mantenimiento de este pluviógrafo es similar al del medidor de pesaje (véase la sección 6.5.1.3), salvo que la calibración se realiza utilizando un volumen conocido de agua.

6.6 **MEDICIÓN DEL ROCÍO, DE LA ACUMULACIÓN DE HIELO Y DE LA PRECIPITACIÓN DE NIEBLA**

6.6.1 **Medición del rocío y de la humedad de las hojas**

El depósito de rocío es esencialmente un fenómeno nocturno y, aunque de proporciones relativamente pequeñas y muy variable según los lugares, es de gran interés en las zonas áridas; en las regiones muy áridas puede ser del mismo orden de magnitud que la lluvia. La exposición de las hojas de las plantas a la humedad líquida del rocío, la niebla y la precipitación desempeña también una importante función en las enfermedades de las plantas, en la actividad de los insectos y en la recolección y la conservación de los cultivos.

Con el fin de evaluar la contribución hidrológica del rocío, es necesario distinguir entre el rocío formado:

- a) como resultado del transporte hacia abajo de la humedad atmosférica condensada en superficies frías, denominado rocío de precipitación;
- b) por el vapor de agua procedente del suelo y de las plantas y condensado en superficies frías, denominado rocío de destilación;
- c) como agua exudada por hojas, conocido como gutación.

Las tres fuentes pueden contribuir simultáneamente a la formación del rocío observado, aunque solo la primera aporta agua adicional a la superficie, y la última tiene generalmente como resultado una pérdida neta. Otra fuente de humedad es la procedente de gotitas de niebla o de nube reunidas por las hojas y ramitas de la vegetación, que llegan al suelo por goteo o resbalando sobre los tallos.

La cantidad de rocío depositado en una superficie dada y en un período determinado se expresa habitualmente en kilogramos por metro cuadrado o en milímetros de espesor del rocío. Siempre que fuera posible, la cantidad debería medirse con una resolución de una décima de milímetro.

La humedad de las hojas puede describirse como ligera, moderada o grande, pero sus medidas más importantes son el instante de comienzo y la duración.

En OMM (1992*b*) se analizan los instrumentos concebidos para medir el rocío y la duración de la humedad de las hojas, y también figura bibliografía.

Se han tomado en consideración los métodos que se describen a continuación para medir la humedad de las hojas.

La cantidad de rocío depende esencialmente de las propiedades de la superficie, tales como sus propiedades radiativas, su tamaño y su aspecto (horizontal o vertical). Puede medirse exponiendo una lámina o superficie, natural o artificial, con propiedades conocidas o normalizadas, y evaluar la cantidad de rocío pesándola, observándola visualmente o utilizando alguna otra magnitud, como la conductividad eléctrica. El problema radica en la elección de la superficie, porque los resultados obtenidos instrumentalmente no son necesariamente representativos del depósito de rocío en objetos próximos. Por tanto, deberían establecerse relaciones empíricas entre las mediciones instrumentales y el depósito de rocío sobre una superficie natural, para cada serie particular de condiciones de superficie y exposición; también tendrían que establecerse relaciones empíricas para distinguir los diferentes procesos de formación de rocío, cuando ello sea importante para la aplicación de que se trate.

Se utilizan diversos instrumentos para efectuar la medición directa de la formación, cantidad y duración de la humedad y el rocío de las hojas. Los registradores de duración del rocío utilizan elementos que cambian por sí mismos, de tal modo que indican o registran el período de humedad, o bien están dotados de sensores eléctricos en los que la conductividad eléctrica de la superficie de las hojas naturales o artificiales cambia en presencia del agua debida a la lluvia, la nieve, la niebla húmeda o el rocío. En las mediciones del rocío, la cantidad de humedad depositada en forma de precipitación o rocío se pesa y se registra. En la mayoría de los instrumentos que permiten un registro continuo es posible distinguir entre los depósitos de humedad causados por la niebla, el rocío o la lluvia, considerando el tipo de traza. El único método seguro para efectuar la medición directa del rocío neto de precipitación es utilizar un lisímetro muy sensible (véase el capítulo 10 de la parte I).

En OMM (1992*b*) se recomienda desarrollar, como instrumentos de referencia, dos instrumentos electrónicos particulares para medir la humedad de las hojas, y se proponen varios modelos de simulación de humedad de las hojas. Algunos utilizan un procedimiento de equilibrio de energía (el inverso a los modelos de evaporación), en tanto que otros utilizan correlaciones. Muchos de ellos requieren mediciones micrometeorológicas. Lamentablemente, no existe ningún método de medición normalizado reconocido para verificarlos.

6.6.2 **Medición de la acumulación de hielo**

El hielo puede acumularse en las superficies como resultado de varios fenómenos. La acumulación de hielo como consecuencia de la precipitación congelada, denominada con frecuencia hielo liso o cencellada transparente, representa el tipo más peligroso de condición de congelación y puede causar grandes daños a árboles, arbustos, líneas telefónicas y eléctricas, así como crear situaciones de riesgo en carreteras y en pistas de aeródromos. La escarcha (denominada generalmente helada) se forma cuando el aire con una temperatura de punto de rocío por debajo del nivel de congelación se satura por enfriamiento. La escarcha es un depósito de cristales de hielo entremezclados, formados por sublimación directa sobre objetos (normalmente de pequeño diámetro) tales como ramas de árboles, tallos de plantas, bordes de hojas, alambres, postes, etc. La cencellada blanca es un depósito de hielo opaco, de aspecto granular y color blanco o lechoso, formado por la rápida congelación de gotas de agua subfundidas al tomar contacto con un objeto expuesto.

6.6.2.1 **Métodos de medición**

En las estaciones meteorológicas, la observación de la acumulación de hielo es generalmente más cualitativa que cuantitativa, debido sobre todo a la falta de un sensor apropiado. Se utilizan indicadores de acumulación de hielo, normalmente de aluminio anodizado, para observar y comunicar la precipitación congelada, la helada o la congelación en forma de cencellada blanca.

Las observaciones de acumulación de hielo pueden comprender la medición de las dimensiones y el peso del depósito de hielo, así como una descripción visual de su apariencia. Estas observaciones son particularmente importantes en zonas montañosas, donde tal acumulación a barlovento de una montaña puede rebasar la precipitación normal. Para acumular hielo se puede utilizar un sistema consistente en varillas y estacas con dos pares de alambres paralelos, uno con orientación norte-sur y el otro con orientación este-oeste. Los alambres pueden estar suspendidos a cualquier nivel, y el superior de cada par debería ser desmontable. En el momento de la observación se quitan ambos alambres superiores, se colocan en un recipiente especial y se llevan al interior para proceder a la fusión y al pesado del depósito, cuya sección transversal se mide sobre los alambres más bajos fijados permanentemente.

En algunos países se utilizan instrumentos para registrar continuamente la cencellada blanca. Como sensor se emplea una varilla, un anillo o una lámina vertical u horizontal, y el aumento de la cantidad de cencellada blanca con el tiempo se registra en una banda. Para determinar la aparición y la presencia de cencellada blanca y de escarcha en una superficie nevada se recurre a un dispositivo sencillo llamado medidor de hielo, que consiste en un disco redondo de madera contrachapada, de 30 cm de diámetro, que puede moverse hacia arriba o hacia abajo y ponerse a cualquier altura de una varilla vertical fijada en el suelo. Normalmente, el disco se pone a nivel con la superficie nevada para recoger la cencellada blanca y la escarcha. La cencellada se obtiene también con un anillo de 20 cm de diámetro fijado a la varilla, a 20 cm de su extremo superior. Para la observación de depósitos de cencellada blanca se emplea un alambre o hilo de 0,2 a 0,3 mm de diámetro, estirado entre el anillo y el extremo superior de la varilla. En caso necesario, puede retirarse y pesarse cada sensor.

En la norma ISO 12494:2001 (ISO, 2001), aplicable a la acumulación de hielo en todo tipo de estructuras, excepto los conductores del tendido eléctrico aéreo, se describe un dispositivo normalizado para la medición del hielo de la siguiente forma:

- a) Un cilindro liso de 30 mm de diámetro ubicado con el eje vertical y en rotación alrededor del eje. La longitud del cilindro debería ser de 0,5 m como mínimo pero, si se prevén grandes acumulaciones de hielo, debería ser de 1 m.
- b) El cilindro se coloca a una altura de 10 m sobre el terreno.
- c) El registro del peso del hielo puede realizarse de manera automática.

En Fikke y otros (2007) se describen varios tipos de detectores de hielo, algunos utilizados para el principio y el final de los períodos de hielo, y otros que permiten además cuantificar el índice de acumulación de hielo (normalmente expresado en kilogramos por metro cuadrado por hora). Muchos sensores se basan en la medición de la masa de hielo en un tubo vertical utilizado como diana. Un sensor óptico (rayo infrarrojo) detecta la variación de las propiedades de reflexión del tubo diana cuando está cubierto de hielo. Otro sensor, muy utilizado para lluvia engelante, consta de una sonda vibrante. El hielo acumulado en la sonda cambia la frecuencia de vibración, lo que permite tanto detectar condiciones de hielo como estimar el índice de acumulación. Se utiliza un dispositivo calefactor de la sonda para fundir el hielo y mantener al sensor dentro de sus límites operativos.

6.6.2.2 ***Hielo en pavimentos***

Se han desarrollado sensores para detectar y describir el hielo en las carreteras y en las pistas de aeródromos, y para apoyar programas de alerta y mantenimiento. En el capítulo 9 de la parte II se encontrará información más específica al respecto.

Combinando mediciones se puede detectar la nieve seca y la nieve húmeda, así como diversas formas de hielo. Con un sensor provisto de dos electrodos en conexión con el agua de la carretera se mide la conductividad eléctrica de la superficie y se distinguen rápidamente las superficies seca y húmeda. Con una segunda medición, de polarizabilidad iónica, se determina la capacidad de la superficie para soportar una carga eléctrica: se pasa una pequeña carga entre un par de electrodos durante un breve período, y los mismos electrodos miden la carga

residual, que es más alta cuando hay un electrólito con iones libres, como en el caso del agua salada. Las mediciones conjuntas de la polarizabilidad y de la conductividad permiten distinguir entre superficies secas, húmedas y mojadas, helada, nieve, hielo blanco y algunas sustancias químicas descongelantes. Sin embargo, como la polarizabilidad del hielo oscuro no cristalino no se distingue de la del agua en algunas condiciones, puede que no se detecte con los dos sensores el peligroso estado de hielo oscuro. Al menos en un sistema, este problema se ha resuelto agregando una tercera medición capacitiva especializada que detecta la estructura única del hielo oscuro.

Dicho método es pasivo. Hay una técnica activa *in situ* que utiliza un elemento térmico, o un elemento térmico y otro de refrigeración, para derretir o congelar cualquier hielo o líquido presente en la superficie. Las mediciones simultáneas de temperatura y de la energía térmica relativas al ciclo de descongelación y congelación se utilizan para determinar la presencia de hielo y para estimar el punto de congelación de la mezcla en la superficie.

La mayoría de los sistemas *in situ* incluyen un termómetro para medir la temperatura en la superficie de la carretera. La calidad de la medición depende fundamentalmente de la instalación (especialmente de los materiales) y de la exposición, y hay que tratar de evitar los errores de radiación.

Se están desarrollando dos métodos de teledetección que pueden utilizarse en sistemas montados en automóviles. El primero se basa en la reflexión de la radiación infrarroja o de microondas en varias frecuencias (unos 3 000 nm y 3 GHz, respectivamente). Las reflexiones de microondas pueden determinar el espesor de la capa de agua (y, por tanto, el peligro de deslizamiento), pero no la condición de hielo. Se pueden emplear dos frecuencias de infrarrojo para distinguir entre condiciones secas, húmedas y de congelación. También se ha demostrado la dependencia de la magnitud de la potencia reflejada, en longitudes de onda de unos 2 000 nm, con respecto al espesor de la capa de hielo.

El segundo método aplica técnicas de reconocimiento de patrones a la reflexión de la luz del láser en el pavimento, para distinguir entre las superficies seca y húmeda y el hielo oscuro.

6.6.3 Medición de la precipitación de niebla

La niebla consiste en gotas de agua muy pequeñas suspendidas en la atmósfera, que forman una nube sobre la superficie terrestre. Las gotas de niebla tienen un diámetro del orden de 1 a 40 μm , y velocidades de caída comprendidas entre menos de 1 y 5 cm s^{-1} aproximadamente. En realidad, las velocidades de caída de las gotas de niebla son tan bajas que, incluso con vientos débiles, pueden desplazarse casi horizontalmente. En caso de niebla, la visibilidad horizontal es inferior a 1 km, y raramente se observa cuando la temperatura y el punto de rocío difieren en más de 2 °C.

A los meteorólogos les interesa generalmente más la niebla como obstrucción para la visión que como forma de precipitación. Sin embargo, desde un punto de vista hidrológico, existen zonas forestales elevadas que experimentan frecuentes episodios de niebla como resultado de la advección de nubes sobre la superficie de la montaña, de donde, si se considera solo la precipitación, se puede subestimar notablemente la entrada de agua en la cuenca (Stadtmuller y Agudelo, 1990). Más recientemente, el reconocimiento de la niebla como fuente de suministro de agua en zonas altas (Schemenauer y Cereceda, 1994a) y como vía de depósito de humedad (Schemenauer y Cereceda, 1991; Vong y otros, 1991) ha generado la necesidad de normalizar métodos y unidades de medición. Se han tomado en consideración los métodos de medición de la precipitación de niebla que se describen a continuación.

Aunque en el último siglo se hayan efectuado numerosas mediciones de la recogida de niebla por los árboles y diversos tipos de colectores, es difícil comparar cuantitativamente las tasas de recogida. El instrumento de medición de la niebla más utilizado consiste en un cilindro vertical de malla metálica fijado centralmente en la parte superior de un pluviómetro, de manera que esté totalmente expuesto a la libre circulación del aire. El cilindro tiene 10 cm de diámetro en su base y 22 cm de altura, y las dimensiones de la malla son de 0,2 cm por 0,2 cm (Grunow, 1960). Las gotas procedentes del aire cargado de humedad se depositan en la malla y caen al colector

del pluviómetro, donde se miden o registran de la misma forma que la lluvia. Ese instrumento plantea algunos problemas, como su pequeño tamaño, la falta de representatividad con respecto a la vegetación, el almacenamiento de agua en las pequeñas aberturas de la malla, y la posibilidad de que la precipitación penetre directamente en la parte del pluviómetro, con lo que se confunde la medición de depósitos de niebla. Además, el cálculo de la precipitación de la niebla, sustrayendo simplemente la cantidad de lluvia en un pluviómetro estándar (Grunow, 1963) de la del colector de niebla, conduce a resultados erróneos siempre que hay viento.

Schemenauer y Cereceda (1994b) proponen utilizar un colector de niebla económico normalizado de 1 m² y un equipo estándar de medición para cuantificar la importancia del depósito de niebla en el caso de zonas forestales elevadas, y para medir las posibles tasas de recogida en cordilleras desiertas o sin vegetación. El colector consiste en una placa plana de polipropileno con su base montada a 2 m del suelo. El colector está unido a un pluviómetro de cubeta basculante para determinar las tasas de deposición. Cuando se realizan mediciones de la velocidad del viento junto con el colector de niebla, pueden hacerse estimaciones razonables de las proporciones de niebla y de lluvia depositadas en la placa de malla vertical. Los resultados de este colector se miden en litros de agua. Como la zona de superficie es de 1 m², esto da una recogida en litros por metro cuadrado.

6.7 MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE NIEVE Y DE LA CAPA DE NIEVE

Los textos fidedignos sobre este tema son OMM (2008) y OMM (1992a), que abarcan los aspectos hidrológicos, incluidos los procedimientos, para estudiar la nieve en las zonas nivométricas. A continuación figura una reseña de algunos métodos sencillos y bien conocidos, así como un breve análisis de los instrumentos.

La precipitación de nieve es el espesor de la capa de nieve fresca depositada en el suelo durante un período dado (generalmente 24 horas). Por tanto, la precipitación de nieve no comprende la deposición por arrastre eólico o la ventisca de nieve. Para mediciones del espesor, el término "nieve" debería comprender también el hielo granulado, el hielo liso, el granizo, y la capa de nieve formada directa o indirectamente como consecuencia de la precipitación. Por espesor de la nieve se entenderá normalmente el espesor total de nieve en el suelo en el momento de la observación.

El equivalente en agua de una capa de nieve es el espesor de la capa de agua que se obtendría fundiendo la capa de nieve.

6.7.1 Espesor de la nieve caída

Las mediciones directas del espesor de la nieve fresca en suelo abierto se hacen con una regla o escala graduada. Deberían realizarse suficientes mediciones verticales, en lugares donde se considera que no hay arrastre eólico, para obtener una media representativa; en cambio, allí donde se produzca un amplio arrastre de la nieve se precisará realizar un número mayor de mediciones para obtener un espesor representativo. Habría que tomar precauciones especiales para no medir ninguna nieve caída anteriormente. Esto puede hacerse barriando previamente una porción adecuada de terreno o cubriendo la parte superior de la superficie de la nieve antigua con un material adecuado (como madera con una superficie ligeramente rugosa, pintada de blanco) y midiendo el espesor acumulado sobre ella. En una superficie inclinada (que debería evitarse, de ser posible) las mediciones deberían realizarse verticalmente con una varilla. Cuando exista una capa de nieve caída con anterioridad, no sería correcto calcular el espesor de la nieve nueva por la diferencia entre dos mediciones consecutivas del espesor de nieve total, puesto que la nieve que cae suele comprimirse y sufrir ablación.

6.7.2 Mediciones directas del espesor de la capa de nieve

Las mediciones del espesor de la capa de nieve o nieve acumulada en el suelo se realizan con una regla o una varilla graduada similar, con la que se atraviesa la nieve hasta la superficie del suelo. En espacios abiertos puede resultar difícil obtener mediciones representativas del espesor con este método, puesto que la capa de nieve está sometida al arrastre eólico y a la redistribución por el viento, y puede haber capas de hielo que limiten la penetración de la regla. Debería garantizarse que se mide el espesor total, incluido el de cualquier capa de hielo que pudiera existir. En cada estación de observación se efectúan y promedian varias mediciones.

Un método apropiado para medir el espesor total de la nieve en el suelo, especialmente en regiones alejadas, es disponer cierto número de estacas de nieve, pintadas con anillos de colores diversos u otra escala adecuada. El espesor de la nieve en la estaca o dispositivo de marcación puede observarse desde puntos del suelo distantes o desde una aeronave, con prismáticos o telescopios. Las estacas deberían estar pintadas de blanco para reducir al mínimo la fusión indebida de la nieve que las rodea. Los marcadores aéreos del espesor de nieve son postes verticales (de longitud variable, según sea el espesor máximo de la nieve) con traviesas horizontales montadas a alturas fijas sobre dichos postes y orientadas con referencia al punto de observación.

El uso de un dispositivo ultrasónico y económico de determinación de la distancia para obtener mediciones del espesor fiables en estaciones automáticas es otro medio factible para la observación normalizada, tanto del espesor de la capa de nieve como de la nieve recién caída (Goodison y otros, 1988). Existen varios modelos ultrasónicos en el mercado y suelen utilizarse con sistemas automáticos. Este tipo de sensores también pueden utilizarse para controlar la calidad de las mediciones de registro automático al proporcionar detalles adicionales sobre el tipo, la cantidad y el momento de la precipitación. Se puede lograr una incertidumbre de ± 1 cm.

La fórmula de corrección de la temperatura para mediciones del espesor de la nieve mediante ultrasonidos es:

$$d = d_r \sqrt{\frac{T}{273,15}} \quad (6.3)$$

donde d es el espesor de la nieve en centímetros; d_r es el valor bruto del espesor de la nieve en centímetros; T es la temperatura del aire en kelvins; y $T = 273,15 + t$, donde t es la temperatura del aire en grados Celsius.

Otro nuevo diseño reciente utiliza un rayo láser visible modulado y determina la distancia hasta el suelo comparando la información de fase. La medición de la distancia es independiente de la temperatura del aire, pero puede depender de la penetración del rayo láser en la superficie nevada según el tipo de nieve. Además, el punto del láser es muy pequeño, lo que aumenta la importancia de la representatividad de la superficie del suelo.

La selección de una zona con vegetación natural puede dar problemas, por lo que tal vez sea preferible utilizar una superficie estable y controlada, como césped artificial, con buen contacto térmico con el suelo. Algunos Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales han notificado buenos resultados con el uso de superficies especiales al efecto (véase OMM, 2010).

6.7.3 Mediciones directas del equivalente en agua de la nieve

El método normal para medir el equivalente en agua es la medición gravimétrica, que se realiza utilizando un tubo de nieve para obtener una muestra. Este método sirve de base para los estudios nivométricos, procedimiento común en muchos países para medir el equivalente en agua. El método consiste en fundir cada muestra y medir su contenido líquido, o bien en pesar la muestra congelada. Para fundir la muestra puede utilizarse una cantidad medida de agua templada o una fuente de calor.

Con un muestreador de nieve apropiado pueden obtenerse muestras cilíndricas de nieve fresca, que se pesan o se funden. En OMM (2008) se describen detalles de los instrumentos y de las técnicas de muestreo disponibles. Con este método puede utilizarse un pluviómetro estándar.

Con los nivómetros se mide directamente el equivalente en agua de la nieve caída. Esencialmente, puede utilizarse también cualquier medidor de precipitación no registrador para medir el equivalente en agua de la precipitación sólida. La nieve recogida con esos tipos de medidores debería pesarse o fundirse inmediatamente después de cada observación, según se describe en la sección 6.3.1.2. El medidor de pesaje capta tanto las formas sólidas de precipitación como las líquidas, y registra el equivalente en agua de la misma manera que para las formas líquidas (véase la sección 6.5.1).

El equivalente en agua de la precipitación sólida puede estimarse asimismo utilizando la medida del espesor de la capa de nieve fresca. Esta medición se convierte en equivalente en agua mediante el empleo de una densidad específica apropiada. Si bien la relación según la cual 1 cm de nieve fresca equivale a 1 mm de agua puede utilizarse con cautela para los valores medios correspondientes a períodos largos, esto puede ser muy impreciso para una sola medición, pues la densidad específica de la nieve puede variar entre 0,03 y 0,4.

6.7.4 Colchones nivométricos

Se utilizan colchones nivométricos de varias dimensiones y materiales para medir el peso de la nieve que se acumula sobre ellos. Los colchones más comunes son planos y circulares (3,7 m de diámetro), de material cauchutado, rellenos de una mezcla anticongelante de alcohol metílico y agua o de una solución de metanol, glicol y agua. El colchón se instala sobre la superficie del suelo, al mismo nivel que él o enterrado bajo una delgada capa de tierra o de arena. Con el fin de impedir que se deteriore el equipo, y también para conservar la capa de nieve en su condición natural, se recomienda que el lugar de medición esté cercado. En condiciones normales, los colchones nivométricos pueden utilizarse durante 10 años o más.

La presión hidrostática en el interior del colchón constituye una medida del peso de la nieve sobre el mismo. La medición de la presión hidrostática mediante un registrador del nivel del líquido por flotador o, mediante un transductor de presión, constituye un método de registro continuo del equivalente en agua de la capa de nieve. Las variaciones de la exactitud de las mediciones pueden deberse a cambios de temperatura. En una capa de nieve poco profunda, los cambios diarios de temperatura pueden originar la expansión o contracción del fluido en el colchón, lo que da indicaciones espurias de la caída de nieve o de la fusión de nieve. En zonas de grandes montañas, las fluctuaciones de la temperatura diaria no son importantes, salvo al comienzo y al final de la estación de nieves. El tubo de acceso y el equipo de medición deberían instalarse en una garita con temperatura controlada o en el suelo, para reducir los efectos térmicos.

Pueden instalarse sistemas de adquisición de datos *in situ* y/o de telemetría, para proporcionar mediciones continuas del equivalente en agua de la nieve, por medio de registradores de banda o digitales.

Las mediciones de los colchones nivométricos difieren de las efectuadas con los tubos normales de nieve, especialmente durante el período de deshielo. Son muy seguras cuando la capa de nieve no contiene capas de hielo que pueden provocar la formación de "puentes" por encima de los colchones.

La comparación del equivalente en agua de la nieve determinado mediante colchones nivométricos, con las mediciones efectuadas por el método normal de pesaje, indica que las diferencias pueden ser de un 5% a un 10%.

6.7.5 Nivómetros por radioisótopos

Los nivómetros nucleares miden el total de equivalente en agua de la capa de nieve y/o proporcionan un perfil de densidad. Se trata de métodos no destructivos de muestreo, adaptables a los sistemas de registro *in situ* y/o de telemetría. Casi todos los sistemas funcionan sobre la base del principio de que el agua, la nieve y el hielo atenúan la radiación. Al igual que ocurre con otros métodos de medición puntual, el emplazamiento en una ubicación representativa resulta fundamental para interpretar y aplicar las mediciones puntuales como índices zonales.

Los nivómetros utilizados para medir el contenido total de agua consisten en un detector de radiación y una fuente, natural o artificial. Una parte del sistema (por ejemplo, el detector o la fuente) se encuentra en la base del manto de nieve, y la otra a una altura mayor que el máximo previsto del espesor de la nieve. Al acumularse la nieve, la velocidad de cómputo del nivómetro disminuye en proporción al equivalente en agua del manto de nieve. Los sistemas que utilizan una fuente de radiación artificial se emplean en ubicaciones fijas, para obtener mediciones únicamente de ese emplazamiento. Se ha empleado con éxito un sistema que utiliza uranio de origen natural como fuente anular en torno a un solo buscapolos para medir mantos de hasta 500 mm en equivalente de agua, o 150 cm de espesor.

Un nivómetro radiactivo de perfilación situado en un lugar fijo proporciona datos sobre el equivalente total en agua de la nieve y la densidad, y permite estudiar con precisión los movimientos de agua y los cambios de densidad que se producen con el tiempo en un manto de nieve (Armstrong, 1976). Este nivómetro consiste en dos tubos paralelos, de acceso vertical, separados por aproximadamente 66 cm, que se elevan desde una base de cemento en el suelo hasta una altura superior al máximo previsto del espesor de la nieve. En uno de los tubos se suspende una fuente de rayos gamma, y en el otro un detector de centelleo de rayos gamma unido a un tubo fotomultiplicador. La fuente y el detector se disponen a la misma profundidad en el interior de la capa de nieve, y se efectúa una medición. Los perfiles de densidad vertical de la capa de nieve se obtienen efectuando mediciones a incrementos de unos 2 cm de profundidad. Un nivómetro portátil (Young, 1976), que mide la densidad de la capa de nieve por retrodispersión en vez de por transmisión de los rayos gamma, ofrece una alternativa práctica a la excavación de profundos hoyos en la nieve, en tanto que la portabilidad del instrumento permite evaluar las variaciones de densidad zonales y el equivalente en agua.

6.7.6 Radiación gamma natural

El método de medición de la nieve por radiación gamma se basa en la atenuación ejercida por la nieve en la radiación gamma procedente de los elementos radiactivos naturales existentes en la capa superior del suelo. Cuanto mayor sea el equivalente en agua de la nieve, mayor será la atenuación de la radiación. Los estudios sobre la radiación gamma terrestre pueden consistir en una medición puntual en un lugar alejado, en una serie de mediciones puntuales, o en la medición a lo largo de una línea transversal seleccionada sobre una región (Loijens, 1975). El método puede utilizarse igualmente en aeronaves. El equipo comprende un espectrómetro portátil de rayos gamma que emplea un pequeño cristal de centelleo para medir los rayos en un amplio espectro y en las tres ventanas espectrales (a saber, emisiones de potasio, uranio y torio). Con este método, hay que efectuar mediciones de los niveles gamma en el punto o a lo largo de la línea transversal previa a la capa de nieve. Para obtener estimaciones absolutas del equivalente en agua de la nieve, es preciso corregir las lecturas a fin de tener en cuenta los cambios en la humedad de la capa superior del suelo, entre los 10 y 20 cm, así como las variaciones en la radiación de fondo resultantes de los rayos cósmicos, la deriva de los instrumentos, y la eliminación de gas radón (que es una fuente de radiación gamma) mediante la precipitación, con la consiguiente acumulación en el suelo o en la nieve. También para determinar la relación entre las velocidades de cómputo del espectrómetro y el equivalente en agua hay que efectuar primero mediciones complementarias del equivalente en agua de la nieve. La norma de referencia común es el conjunto de mediciones efectuadas con un tubo de nieve.

El método gamma natural puede utilizarse para mantos de nieve con un equivalente en agua de 300 mm; con correcciones apropiadas, su incertidumbre es de ± 20 mm. La ventaja de este método con respecto al empleo de fuentes de radiación artificiales es que no existe riesgo de radiación.

6.7.7 **Nivómetro de rayos cósmicos**

El nivómetro de rayos cósmicos permite medir en tiempo real el equivalente en agua de la nieve midiendo la absorción de los neutrones de rayos cósmicos por el agua del manto de nieve. Esos neutrones son originados por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera y el agua. Los rayos cósmicos entrantes pueden fluctuar, hasta el 20%, en períodos de entre unos días y unos meses. Una variación del 20% del flujo entrante tiene aproximadamente el mismo efecto que la absorción de en torno a 250 mm de agua. Por tanto, se necesita una señal de referencia sin nieve para calcular las variaciones naturales de los rayos cósmicos. Puede utilizarse una única medición de referencia para una red cerrada de nivómetros.

Sería esencial realizar una calibración local de cada dispositivo con mediciones del nivómetro *in situ*. Con estas precauciones, la exactitud y fiabilidad de las mediciones del nivómetro de rayos cósmicos son enteramente satisfactorias (Paquet y Laval, 2006).

ANEXO 6.A. EMPLAZAMIENTOS PARA LA INTERCOMPARACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

El siguiente texto, sobre los emplazamientos para la intercomparación de la precipitación, se basa en declaraciones formuladas por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su undécima reunión, celebrada en 1994, y se ha actualizado después de la decimoquinta reunión, celebrada en 2010:

La Comisión reconoció la utilidad de los emplazamientos o centros nacionales de medición de la precipitación en los que puedan evaluarse los instrumentos y métodos de observación de la precipitación pasados, presentes y futuros sobre la base de las actuales estaciones de evaluación. Dichas estaciones deberían:

- a) Utilizar las configuraciones de medidores de la precipitación recomendadas por la OMM para la lluvia (pluviómetro enterrado de referencia) y la nieve (referencia de intercomparación de doble cerca (RIDC)). La instalación y el funcionamiento seguirán las especificaciones formuladas por las comparaciones de la OMM de instrumentos sobre la precipitación. Cuando solo se obtienen datos para medir la lluvia no es necesaria una instalación conforme a la RIDC.
 - b) Emplear tipos antiguos, actuales y nuevos de pluviómetros para el registro de la precipitación, u otros métodos de observación con arreglo a los procedimientos corrientes de funcionamiento y evaluar la exactitud y rendimiento comparándolos con los instrumentos de referencia recomendados por la OMM.
 - c) Realizar mediciones meteorológicas auxiliares que hagan posible la elaboración y realización de pruebas de aplicación de los procedimientos de corrección de datos sobre la precipitación.
 - d) Realizar el control de la calidad de los datos y archivar todos los datos concernientes a la intercomparación de la precipitación, y en particular los relativos a las observaciones meteorológicas y a los metadatos, en un formato fácilmente aceptable, de preferencia digital.
 - e) Funcionar ininterrumpidamente durante 10 años como mínimo.
 - f) Poner a prueba todos los procedimientos de corrección de los datos relativos a la precipitación disponibles (especialmente los que se describen en los informes finales de las intercomparaciones de la OMM) sobre la medición de la precipitación líquida y sólida.
 - g) Facilitar la realización de estudios e investigación sobre las mediciones de la precipitación. No se espera que los centros se encarguen de la calibración o verificación de los instrumentos. Deberían formular recomendaciones sobre las normas nacionales de observación y deberían asimismo evaluar el impacto de los cambios de métodos de observación sobre la homogeneidad de las series temporales de precipitación en la región. El emplazamiento sería un patrón de referencia para la calibración y validación de las observaciones de la precipitación realizadas por teledetección o radar.
-

ANEXO 6.B. PROCEDIMIENTOS QUE SE SUGIEREN PARA LA CORRECCIÓN DE LAS MEDICIONES DE LA PRECIPITACIÓN

El siguiente texto, sobre los procedimientos que se sugieren para la corrección de las mediciones de la precipitación, se basa en declaraciones formuladas por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su undécima reunión, celebrada en 1994:

Los métodos de corrección se basan en conceptos físicos simplificados presentados anteriormente en OMM (1987). Estos métodos dependen del tipo de medidor de la precipitación utilizado. El efecto del viento en un tipo determinado de medidor de la precipitación ha sido evaluado utilizando mediciones de la intercomparación con los medidores de referencia de la OMM: el pluviómetro enterrado para la lluvia y la referencia de intercomparación de doble cerca (RIDC) para la nieve, según se presenta en OMM (1984) y en los resultados de la Intercomparación de la OMM de mediciones de la precipitación sólida (OMM, 1998). La reducción de la velocidad del viento al nivel del orificio del pluviómetro debería efectuarse aplicando la fórmula siguiente:

$$u_{hp} = \left(\log h z_0^{-1} \right) \cdot \left(\log H z_0^{-1} \right)^{-1} \cdot (1 - 0,024\alpha) u_H$$

en la que u_{hp} es la velocidad del viento al nivel del orificio del pluviómetro; h es la altura del orificio del pluviómetro sobre el suelo; z_0 es la longitud de rugosidad (0,01 m para el invierno y 0,03 m para el verano); H es la altura del instrumento de medición de la velocidad del viento sobre el suelo; u_H es la velocidad del viento medida a la altura H sobre el suelo; y α es el ángulo vertical medio de los obstáculos que circundan el medidor de precipitación.

Este último depende de la exposición del emplazamiento del medidor de precipitación y puede basarse ya sea en el valor medio de las mediciones directas, en una de las ocho direcciones principales de la rosa de los vientos del ángulo vertical de los obstáculos (en 360°) que circundan el medidor de precipitación, o en la clasificación de la exposición utilizando metadatos almacenados en los archivos de los servicios meteorológicos. Las clases son las siguientes:

Clase	Ángulo	Descripción
Emplazamiento expuesto	0-5	Solo unos pocos obstáculos pequeños tales como matorrales, grupo de árboles, una casa
Emplazamiento principalmente expuesto	6-12	Pequeños grupos de árboles o matorrales, o una o dos casas
Emplazamiento principalmente protegido	13-19	Parques, linderos de bosques, centros de aldeas, granjas, grupo de casas, terrenos
Emplazamiento protegido	20-26	Bosque joven, pequeño claro de bosque, parque con árboles grandes, centros urbanos, valles profundos y angostos, terreno muy accidentado, sotavento de colinas altas

Las pérdidas por humidificación se producen con la humidificación de las paredes interiores del medidor de precipitación. Estas dependen de la forma y del material del medidor, así como del tipo y la frecuencia de la precipitación. Por ejemplo, cuando se trata del medidor de precipitación Hellmann, ascienden a un promedio de 0,3 mm en un día de lluvia y a 0,15 mm en un día de nieve; los valores respectivos del medidor Tretyakov son de 0,2 mm y 0,1 mm. La información sobre las pérdidas por humidificación para otros tipos de medidores puede hallarse en OMM (1982).

ANEXO 6.C. PLUVIÓMETRO ENTERRADO DE REFERENCIA NORMALIZADO

Los pluviómetros de referencia se instalan en un foso con buen drenaje, según el diseño y las especificaciones que figuran en la norma EN 13798:2010 (CEN, 2010) a fin de reducir al mínimo las interferencias ambientales sobre la intensidad de la lluvia medida y protegidos contra las salpicaduras con rejillas metálicas o plásticas. Previsiblemente, un medidor enterrado o hundido (véase Koschmider, 1934; Sieck y otros, 2007) muestra lecturas de lluvia más elevadas que otro situado en posición elevada respecto al suelo, con diferencias que pueden alcanzar el 10% o más, cuando ambos instrumentos funcionan bien y con exactitud. Los fosos se ubican preferiblemente a nivel del suelo para evitar la posible escorrentía de superficie (véase la configuración general en la figura 6.C.1). El foso debería tener profundidad suficiente para el pluviómetro de manera que el colector esté al mismo nivel que la parte superior de la rejilla (a nivel del suelo) y en el centro de la misma. El diseño del foso tiene en cuenta las dimensiones del pluviómetro y su método de instalación. La base del foso debería tener un hueco (un foso adicional) que permita el drenaje del agua. La superficie cuadrada de la rejilla también se adapta al diámetro del colector del pluviómetro para cumplir los requisitos normalizados establecidos en CEN (2010). Las paredes del foso están formadas por ladrillos y cemento, con sujeción para impedir el derrumbe. Se construyen muros de apoyo a lo largo del borde y se instala una rejilla de aproximadamente 1 875 x 1 875 x 120 mm (L x W x H) sobre ellos de manera que pueda levantarse para acceder al pluviómetro y realizar operaciones de verificación y mantenimiento. El espacio entre las láminas de la rejilla es de unos 120 a 125 mm y esta debe tener resistencia suficiente para que se pueda caminar sobre ella sin provocar distorsiones. Para prevenir salpicaduras de la superficie superior de la rejilla, las láminas que la conforman tendrán un espesor mínimo de 2 mm y la distancia entre el filo del cuadrado central y el suelo será superior a 600 mm (véanse más detalles en CEN, 2010). En la figura 6.C.2 se muestra un ejemplo de instalación de cuatro pluviómetros enterrados de referencia normalizados, como se indica en OMM (2009).

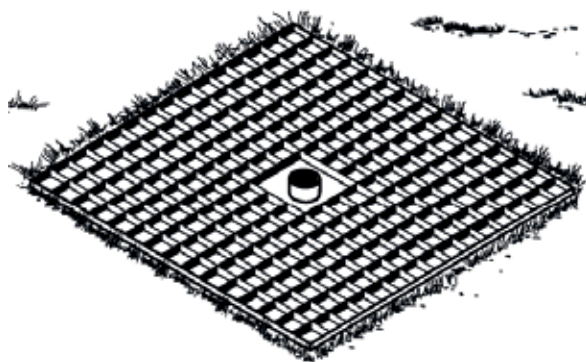


Figura 6.C.1. Un pluviómetro enterrado y su rejilla (configuración a nivel del suelo)

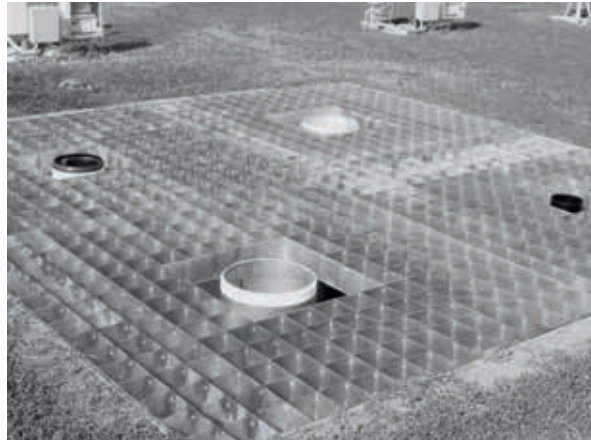


Figura 6.C.2. Instalación de los pluviómetros enterrados de referencia en Vigna di Valle (Italia, 2007) durante la intercomparación de la OMM *in situ* de pluviómetros de medición de la intensidad de la lluvia

ANEXO 6.D. PROCEDIMIENTO NORMALIZADO PARA LA CALIBRACIÓN EN LABORATORIO DE PLUVIÓMETROS DE INTENSIDAD DE LLUVIA POR CAPTACIÓN

1. Principios

El laboratorio de calibración debería estar adecuadamente preparado para realizar calibraciones de instrumentos destinadas a operaciones prácticas. Además de un sistema de referencia adecuadamente diseñado, deberían existir unos procedimientos de calibración establecidos y detalladamente documentados, y el personal tendría que haber sido adecuadamente preparado antes de emprender cualquier actividad de calibración (véanse más detalles en la norma ISO/IEC 17025 (ISO/IEC, 2005)). El resultado de la calibración será un certificado de calibración que enuncie los resultados de la misma (incluidas las correcciones que deban introducirse) y que permita comprobar el cumplimiento de las recomendaciones pertinentes de la OMM.

En el certificado debería indicarse también la incertidumbre con respecto a la medición de la intensidad de lluvia y habrían de documentarse la trazabilidad de la intensidad de lluvia de referencia, las condiciones medioambientales (por ejemplo, la temperatura) y el método de promediado en el tiempo que se ha aplicado.

Los pluviómetros medidores de la intensidad de lluvia se calibrarán utilizando un sistema de calibración que:

- a) sea capaz de generar un flujo constante de agua para distintos valores de caudal que abarquen el rango completo de mediciones en condiciones operativas (el intervalo recomendado va de $0,2 \text{ mm h}^{-1}$ hasta $2\,000 \text{ mm h}^{-1}$);
- b) sea capaz de medir el flujo pesando la cantidad de agua durante un período determinado;
- c) sea capaz de medir la señal de salida del instrumento calibrado a intervalos regulares o cuando se produzca un impulso, que es lo habitual en la mayoría de los pluviómetros de cubeta basculante.

2. Requisitos

- a) El sistema de calibración debería estar diseñado para obtener incertidumbres inferiores al 1% para la intensidad de lluvia generada, y habría que notificar y detallar estos rendimientos.
- b) En el caso de los pluviómetros de cubeta basculante, se tendría que verificar el equilibrado del peso de las cubetas, a fin de garantizar una varianza mínima de la duración de la basculación durante el proceso de medición.
- c) Deberían utilizarse como mínimo cinco intensidades de referencia adecuadamente espaciadas, de modo que abarquen el rango de funcionamiento completo del instrumento.
- d) El número de puntos de referencia de la intensidad de lluvia debería ser lo suficientemente grande para determinar una curva de ajuste mediante interpolación. Habría que seleccionar y espaciar adecuadamente las referencias, de modo que sea posible obtener por interpolación la curva de calibración de tal manera que la incertidumbre de la curva de ajuste sea inferior a la incertidumbre requerida para la medición, para todo el rango.
- e) El cálculo del caudal se basará en las mediciones de masa y de tiempo.
- f) La medición de masa tendrá una exactitud superior al 0,1%.
- g) Cada prueba debería durar lo suficiente como para garantizar una incertidumbre inferior al 1% de la intensidad generada.

- h) La resolución temporal máxima para la medición de las intensidades de lluvia debería ser de un segundo.
- i) Con respecto a las posibles fuentes de error en las actividades de laboratorio, se tendrán presentes los aspectos siguientes:
 - i) La calidad y pureza del agua utilizada para la calibración debería estar perfectamente definida.
 - ii) La reproducibilidad de las condiciones de calibración tendría que ser prioritaria.
 - iii) Debería utilizarse un equipo de control y de registro apropiado (por ejemplo, controlado mediante una computadora personal).
 - iv) Todos los sistemas de adquisición respetarán las normas de compatibilidad electromagnética para evitar impulsos parásitos.
- j) Las mediciones de precipitación suelen notificarse en términos de la magnitud altura, expresada en milímetros, aunque los pluviómetros de pesaje midan unidades de masa. Dado que la densidad de la lluvia depende de la temperatura ambiente, la relación entre la masa y la altura equivalente de lluvia introduce un desajuste que ha de ser tenido en cuenta durante la calibración y el cálculo de la incertidumbre.
- k) Deben anotarse y registrarse las condiciones medioambientales existentes durante cada calibración:
 - i) fecha y hora (comienzo/final);
 - ii) temperatura del aire [°C];
 - iii) temperatura del agua [°C];
 - iv) presión atmosférica [hPa];
 - v) humedad relativa ambiente [%];
 - vi) cualquier otra condición que pudiera afectar a la calibración (por ejemplo, vibraciones);
 - vii) deben estimarse las pérdidas por evaporación [mm].
- l) Debe documentarse el número de pruebas efectuadas para cada instrumento, y su descripción en unidades de tiempo y/o en número de basculaciones.

3. Procedimiento para la interpretación de los datos

- a) Los resultados deberían presentarse en forma gráfica, de modo que el error relativo se represente en función de la intensidad de referencia. El error relativo se evalúa para cada caudal de referencia mediante la fórmula:

$$e = \frac{I_m - I_r}{I_r} \cdot 100\%$$

donde I_m es la intensidad medida por el instrumento e I_r es la intensidad de referencia real proporcionada al instrumento.

- b) Lo ideal sería efectuar cinco pruebas —o al menos tres— por cada serie de intensidades de referencia, de modo que cada instrumento lleve asociadas cinco cantidades de error. El error medio y los valores medios de I_r e I_m se obtienen descartando los valores mínimo y máximo de e obtenidos para cada caudal de referencia y, seguidamente, evaluando la

media aritmética de los tres restantes errores y de los valores de la intensidad de referencia. Para cada intensidad de referencia, debería incluirse en el informe un gráfico de barras de errores que abarque los cinco valores de error utilizados para obtener los promedios.

- c) Además, puede representarse gráficamente I_r en función de I_m , donde I_m e I_r son los valores medios, calculados como se indica anteriormente; todos los datos se ajustan mediante una curva de interpolación, obtenida como curva de ajuste óptimo (resultan aceptables ajustes de tipo lineal, exponencial o polinómico de segundo orden).
- d) En las gráficas de los resultados se deben indicar los límites $\pm 5\%$ para facilitar la comparación de los resultados con las recomendaciones de la OMM.
- e) Si se produjera almacenamiento de agua para un valor de la intensidad inferior al valor máximo declarado, se debería documentar la intensidad a la que comience el almacenamiento en el certificado de calibración, y no deberían tenerse en cuenta los valores de intensidad superiores a ese límite.
- f) Además de las mediciones basadas en caudales constantes, habría que determinar la respuesta por grados de intensidad de los instrumentos pluviométricos que no son de cubeta basculante. La respuesta para cada grado debería medirse conmutando entre dos valores de flujo constante diferentes, desde 0 mm h^{-1} hasta la intensidad de referencia, y siguiendo el recorrido inverso hasta 0 mm h^{-1} . Habría que aplicar el flujo constante hasta que la señal de salida del instrumento se estabilice, es decir, hasta el momento en que puedan desprejarse los cambios o fluctuaciones ulteriores de la intensidad de lluvia establecida con respecto a la incertidumbre de medición declarada para el sistema de referencia. La frecuencia de muestreo será de al menos una muestra por minuto para los instrumentos que lo permitan. Se supondrá que el tiempo transcurrido hasta la estabilización refleja el retardo del instrumento para medir la intensidad de lluvia de referencia. Para conseguir mediciones certeras de la intensidad de lluvia será necesario un retardo inferior a un minuto. El tiempo de respuesta debería estar siempre documentado en el certificado de calibración.

4. Cálculo de la incertidumbre

Deberían considerarse y cuantificarse las siguientes fuentes de incertidumbre de las mediciones:

- a) generador de flujo: incertidumbre con respecto al carácter estacionario del flujo, resultante de posibles variaciones en el mecanismo de generación de flujo constante, incluida la diferencia de presión en el interior del agua y en los conductos de distribución;
- b) dispositivos de medición de flujo (tanto con fines de referencia como de calibración): incertidumbres atribuibles al dispositivo de pesaje, a la medición del tiempo y al retardo en la adquisición y el procesamiento de datos, y a la variación de las condiciones experimentales y ambientales, por ejemplo de la temperatura o de la humedad relativa.

Estas dos fuentes de incertidumbre son independientes entre sí; por consiguiente, puede realizarse un análisis por separado, y agregar conjuntamente los resultados a la incertidumbre total.

ANEXO 6.E. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN *IN SITU* DE PLUVIÓMETROS DE INTENSIDAD DE LLUVIA POR CAPTACIÓN

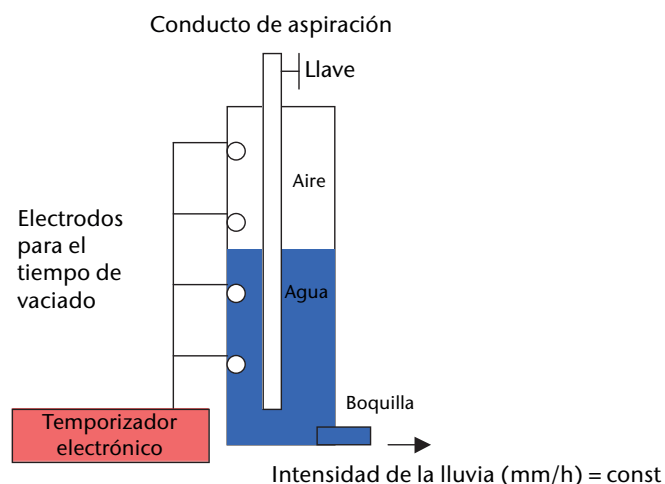
La calibración *in situ* forma parte del mantenimiento y la verificación rutinarias *in situ* y debería realizarse periódicamente. Su finalidad principal es comprobar las condiciones de funcionamiento de los medidores de precipitación: detectar fallos de funcionamiento, anomalías en los resultados y derivas de calibración surgidos con el tiempo o entre dos calibraciones en laboratorio. Las calibraciones *in situ* también aportan datos cuyo análisis e interpretación son de gran valor. El procedimiento se basa en los mismos principios que la calibración en laboratorio (descrita en el anexo 6.D) y emplea la generación de una intensidad constante (flujo de referencia fijo) dentro del rango de uso operativo del medidor.

Un calibrador *in situ* suele constar de un tanque de agua cilíndrico con una capacidad adecuada, una combinación de conductos de aspiración y boquillas de salida para distintas intensidades de lluvia, y un sistema electrónico para calcular el tiempo de vaciado (véase la figura a continuación). Se debe seleccionar la combinación adecuada de conductos de aspiración y boquillas de salida según el tamaño del colector del medidor de precipitación y el valor de intensidad elegido para la calibración. Al abrir la llave superior y la boquilla inferior se transmite un flujo constante al embudo del medidor y, con el tiempo de vaciado y el cuadro de conversión (volumen–tiempo–intensidad), se puede calcular la intensidad de referencia. Los conductos de aspiración compensan la presión, manteniendo así un empuje constante.

Desde un punto de vista operativo, el calibrador *in situ* portátil permite realizar pruebas rápidas por su gran sencillez de funcionamiento. El calibrador no contiene ningún componente complicado, por lo que es una solución rentable para la verificación metrológica de los instrumentos de medición de la intensidad de precipitación.

Antes de utilizar el calibrador *in situ*, debería evaluarse rigurosamente en laboratorio su repetibilidad (y su exactitud). La incertidumbre debería expresarse preferiblemente como incertidumbre ampliada relativa respecto al intervalo de cobertura estadística (95% del nivel de confianza, $k = 2$) y su valor debería ser menor que el 2%.

Para cada medidor de precipitación calibrado *in situ*, debería realizarse un análisis estadístico de los errores relativos respecto al flujo de referencia *in situ* del calibrador. Deberían registrarse como mínimo entre 25 y 30 puntos de datos (normalmente valores de intensidad en períodos de 1 minuto en milímetros por hora) para cada intensidad de referencia (seleccionada por el calibrador *in situ*). Esto permite suponer una distribución normal de los datos en torno al valor medio y mejorar la estimación del promedio y la exactitud de los resultados (teorema del límite central). Todas las pruebas deben realizarse en condiciones ambientales sin precipitación ni niebla y con baja velocidad de viento (para evitar perturbaciones por presión dinámica en los



Esquema simplificado de calibrador *in situ* portátil

conductos de aspiración). La intensidad de referencia siempre debería comenzar al principio de un minuto sincronizado con el reloj del instrumento o el temporizador del registrador de datos (sello de la hora oficial/en la estación).

A continuación se enumeran los parámetros estadísticos mínimos que se deben indicar tras cada calibración *in situ*:

- la fecha y la hora;
- la intensidad de referencia en milímetros por hora (I_{ref}): intensidad constante generada por el calibrador *in situ*;
- el promedio ($avgI$) de los valores de intensidad (I_{imin}) en milímetros por hora del medidor de precipitación durante la calibración, calculado de la siguiente forma:

$$avgI = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_{imin}^j) \quad (6.E.1)$$

- los extremos (es decir, $I_{+CL95\%}$, $I_{-CL95\%}$) de un intervalo $[avgI - \delta(95\%); avgI + \delta(95\%)] = [I_{+CL95\%}; I_{-CL95\%}]$ correspondiente al 95% del nivel de confianza. La amplitud $\delta(95\%)$ es la semianchura del intervalo de confianza calculado según una distribución de probabilidades normal o t de Student de las muestras (incluye un cálculo de la desviación estándar);
- el error relativo como porcentaje de la intensidad promedio, calculado de la siguiente forma:

$$RE_{avgI} = 100 \cdot \left(\frac{avgI - I_{ref}}{I_{ref}} \right) \quad (6.E.2)$$

- los errores relativos como porcentaje de $I_{+CL95\%}$ e $I_{-CL95\%}$, calculados de la siguiente forma:

$$RE_{+CL95\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{+CL95\%} - I_{ref}}{I_{ref}} \right) \quad (6.E.3)$$

$$RE_{-CL95\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{-CL95\%} - I_{ref}}{I_{ref}} \right) \quad (6.E.4)$$

Los tres últimos parámetros estadísticos se utilizan para calcular los errores relativos del medidor en relación con la intensidad, con un intervalo de incertidumbre al 95% del nivel de confianza para cada una de las intensidades de referencia utilizadas durante la calibración. La repetición periódica de la calibración *in situ* y la comparación de los resultados permiten evaluar la estabilidad de la situación de calibración y las posibles anomalías.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Armstrong, R. L., 1976: "The application of isotopic profiling snow-gauge data to avalanche research", en *Proceedings of the Forty-fourth Annual Western Snow Conference*. Servicio del Medio Ambiente Atmosférico, Canadá, págs. 12 a 19.
- Colli, M., L. G. Lanza y P. W. Chan, 2013a: "Co-located tipping-bucket and optical drop counter RI measurements and a simulated correction algorithm", en *Atmospheric Research*, vol. 119, págs. 3 a 12.
- Colli, M., L. G. Lanza y P. La Barbera, 2013b: "Performance of a weighing rain gauge under laboratory simulated time-varying reference rainfall rates", en *Atmospheric Research*, vol. 131, págs. 3 a 12.
- Comité Europeo de Normalización, 2010: *Hidrometría. Especificación para un foso de referencia de instalación de un pluviómetro*, EN 13798:2010.
- Fikke, S., G. Ronsten, A. Heimo, S. Kunz, M. Ostrozklik, P. E. Persson, J. Sabata, B. Wareing, B. Wichura, J. Chum, T. Laakso, K. Sääntti y L. Makkonen, 2007: COST-727: *Atmospheric Icing on Structures; Measurements and data collection on icing: State of the Art*, MeteoSwiss, núm. 75.
- Goodison, B. E., J. R. Metcalfe, R. A. Wilson y K. Jones, 1988: "The Canadian automatic snow depth sensor: A performance update", en *Proceedings of the Fifty-sixth Annual Western Snow Conference*. Servicio del Medio Ambiente Atmosférico, Canadá, págs. 178 a 181.
- Goodison, B. E., B. Sevruk y S. Klemm, 1989: "WMO solid precipitation measurement intercomparison: Objectives, methodology and analysis", en Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (AICH), 1989: *Atmospheric deposition. Proceedings*, Simposio de Baltimore (mayo de 1989), publicación núm. 179 de la AICH, Wallingford.
- Grunow, J., 1960: "The productiveness of fog precipitation in relation to the cloud droplet spectrum", en Unión Geofísica Estadounidense, 1960: *Physics of precipitation*, Geophysical Monograph No. 5, *Proceedings of the Cloud Physics Conference* (3 a 5 de junio de 1959, Woods Hole, Massachusetts), publicación N° 746, págs. 110 a 117.
- , 1963: "Weltweite Messungen des Nebelniederschlags nach der Hohenpeissenberger Methode", en Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, *General Assembly* (Berkeley, California, 19 a 31 de agosto de 1963), Asociación Internacional de Hidrología Científica, publicación núm. 65, págs. 324 a 342.
- Habib, E., W. F. Krajewski y A. Kruger, 2001: "Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements", en *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 6, págs. 159 a 166.
- Instituto Hidrometeorológico de Eslovaquia e Instituto Federal de Tecnología de Suiza, 1993: "Precipitation measurement and quality control", en *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation* (B. Sevruk y M. Lapin, eds.) (Bratislava, 20 a 24 de septiembre de 1993), vol. I, Bratislava y Zúrich.
- Koschmieder, H., 1934: "Methods and results of definite rain measurements; III. Danzig Report (1)", en *Monthly Weather Review*, vol. 62, págs. 5 a 7.
- Legates, D. R. y C. J. Willmott, 1990: "Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation", en *International Journal of Climatology*, vol. 10, págs. 111 a 127.
- Loijens, H. S., 1975: "Measurements of snow water equivalent and soil moisture by natural gamma radiation", en *Proceedings of the Canadian Hydrological Symposium-75* (11 a 14 de agosto de 1975, Winnipeg), págs. 43 a 50.
- Nespor, V. y B. Sevruk, 1999: "Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 16, núm. 4, págs. 450 a 464.
- Niemczynowicz, J., 1986: "The dynamic calibration of tipping-bucket raingauges", en *Nordic Hydrology*, vol. 17, págs. 203 a 214.
- Organización Internacional de Normalización, 2001: *Atmospheric Icing of Structures*, ISO 12494:2001. Ginebra.
- Organización Internacional de Normalización/Comisión Electrotécnica Internacional, 2005: *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, ISO/IEC 17025:2005/Cor 1:2006. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial, 1972: "Evaporation losses from storage gauges" (B. Sevruk), en *Distribution of Precipitation in Mountainous Areas*, Geilo Symposium (Norway, 31 July–5 August 1972). Volume II – technical papers (WMO-No. 326). Ginebra.
- , 1982: *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21 (WMO-No. 589). Ginebra.

- , 1984: *International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge* (B. Sevruck and W.R. Hamon). Instruments and Observing Methods Report No. 17 (WMO/TD-No. 38). Ginebra.
- , 1985: *International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison*. Informe final de la primera reunión (distribuido únicamente a los participantes). Ginebra.
- , 1986: *Papers Presented at the Workshop on the Correction of Precipitation Measurements* (B. Sevruck, ed.) (Zurich, Switzerland, 1–3 April 1985). Instruments and Observing Methods Report No. 25 (WMO/TD-No. 104). Ginebra.
- , 1987: *Instruments Development Inquiry* (E. Prokhorov). Instruments and Observing Methods Report No. 24 (WMO/TD-No. 231). Ginebra.
- , 1989a: *Catalogue of National Standard Precipitation Gauges* (B. Sevruck and S. Klemm). Instruments and Observing Methods Report No. 39 (WMO/TD-No. 313). Ginebra.
- , 1989b: *International Workshop on Precipitation Measurements* (B. Sevruck, ed.) (St Moritz, Switzerland, 3–7 December 1989). Instruments and Observing Methods Report No. 48 (WMO/TD-No. 328). Ginebra.
- , 1992a: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruck, ed.). Instruments and Observing Methods Report No. 48 (WMO-No. 749). Ginebra.
- , 1992b: *Report on the Measurement of Leaf Wetness* (R. R. Getz). Agricultural Meteorology Report No. 38 (WMO/TD-No. 478). Ginebra.
- , 1998: *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Final Report* (B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang). Instruments and Observing Methods Report No. 67 (WMO/TD-No. 872). Ginebra.
- , 2006: *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (L.G. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi and W. Wauben). Instruments and Observing Methods Report No. 84 (WMO/TD-No. 1304). Ginebra.
- , 2008: *Guía de prácticas hidrológicas* (OMM-N° 168), volumen I. Ginebra.
- , 2009: *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (E. Vuerich, C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi and E. Lanzinger), Instruments and Observing Methods Report No. 99 (WMO/TD-No. 1504). Ginebra.
- , 2010: "Optimized snow plates and snow grids for automatic and manual snow depth measurements" (E. Lanzinger y M. Theel), en *Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation* (TECO-2010). Instruments and Observing Methods Report No. 104 (WMO/TD-No. 1546). Ginebra.
- Paquet, E. y M. T. Laval, 2006: "Operation feedback and prospects of EDF Cosmic-Ray Snow Sensors", en *La Houille Blanche*, núm. 2, págs. 113 a 119.
- Rinehart, R. E., 1983: "Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 22, págs. 1404 a 1410.
- Schemenauer, R. S. y P. Cereceda, 1991: "Fog water collection in arid coastal locations", en *Ambio*, vol. 20, núm. 7, págs. 303 a 308.
- , 1994a: "Fog collection's role in water planning for developing countries", en *Natural Resources Forum*, vol. 18, núm. 2, págs. 91 a 100.
- , 1994b: "A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 33, núm. 11, págs. 1313 a 1322.
- Sevruck, B., 1974a: "Correction for the wetting loss of a Hellman precipitation gauge", en *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 19, núm. 4, págs. 549 a 559.
- , 1974b: "Evaporation losses from containers of Hellman precipitation gauges", en *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 19, núm. 2, págs. 231 a 236.
- , 1984: "Comments on 'Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements'", en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 23, págs. 988 a 989.
- Sevruck, B. y V. Nespor, 1994: "The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error", en *Global Precipitation and Climate Change* (M. Desbois y F. Desalmand, eds.). NATO ASI Series, Springer Verlag, Berlín, 126, págs. 231 a 246.
- Sevruck, B. y L. Zahlavova, 1994: "Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application", en *International Journal of Climatology*, vol. 14, núm. 6, págs. 681 a 689.
- Sieck, L. C., S. J. Burges y M. Steiner, 2007: "Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall", en *Water Resources Research*, vol. 43, págs. 1 a 23.
- Smith, J. L., H. G. Halverson y R. A. Jones, 1972: *Central Sierra Profiling Snowgauge: A Guide to Fabrication and Operation*. USAEC Report TID-25986, Servicio Nacional de Información Técnica, Departamento de Comercio de Estados Unidos, Washington, D. C.

- Stadtmuller, T. y N. Agudelo, 1990: "Amount and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest", en *Proceedings of the Lausanne Symposia* (agosto/noviembre). Publicación núm. 193 de la AICh, Wallingford.
- Vong, R. J., J. T. Sigmon y S. F. Mueller, 1991: "Cloud water deposition to Appalachian forests", en *Environmental Science and Technology*, vol. 25, núm. 6, págs. 1014 a 1021.
- Yang, D., J. R. Metcalfe, B. E. Goodison y E. Mekis, 1993: "True Snowfall: An evaluation of the Double Fence Intercomparison Reference Gauge", en *Proceedings of the Fiftieth Eastern Snow Conference*, Ciudad de Quebec, 8 a 10 de junio de 1993, Quebec (Canadá), págs. 105 a 111.
- Yang, D., B. E. Goodison, J. R. Metcalfe, V. S. Golubev, E. Elomaa, T. Gunther, R. Bates, T. Pangburn, C. L. Hanson, D. Emerson, V. Copaciu y J. Milkovic, 1995: "Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: results of WMO intercomparison", en *Hydrological Processes*, vol. 9, págs. 877 a 895.
- Young, G. J., 1976: "A portable profiling snow-gauge: Results of field tests on glaciers", en *Proceedings of the Forty-fourth Annual Western Snow Conference*. Servicio del Medio Ambiente Atmosférico, Canadá, págs. 7 a 11.
-