

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 4. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD	134
4.1 Generalidades	134
4.1.1 Definiciones	134
4.1.2 Unidades y escalas	134
4.1.3 Requisitos meteorológicos	135
4.1.4 Métodos de medición	135
4.1.4.1 Higrómetros	135
4.1.4.2 Exposición: comentarios generales	135
4.1.4.3 Fuentes de error: comentarios generales	136
4.1.4.4 Higrometría gravimétrica	136
4.1.4.5 Métodos basados en la condensación	136
4.1.4.6 Método psicrométrico	137
4.1.4.7 Métodos de sorción	137
4.1.4.8 Absorción de la radiación electromagnética por el vapor de agua (higrómetros de absorción de rayos ultravioletas e infrarrojos)	138
4.1.4.9 Constantes de tiempo de los sensores de humedad	139
4.1.4.10 Mantenimiento: comentarios generales	139
4.1.4.11 Filtros de protección	140
4.2 Psicrómetro	141
4.2.1 Consideraciones generales	141
4.2.1.1 Fórmulas y tablas psicrométricas	141
4.2.1.2 Características de un psicrómetro	142
4.2.1.3 Manguito del termómetro húmedo	142
4.2.1.4 Funcionamiento del termómetro húmedo por debajo del punto de congelación	143
4.2.1.5 Método general de observación	144
4.2.1.6 Utilización de termómetros de resistencia eléctrica	144
4.2.1.7 Fuentes de error	144
4.2.2 Aspiropsicrómetro de Assmann	145
4.2.2.1 Descripción	145
4.2.2.2 Método de observación	146
4.2.2.3 Exposición y emplazamiento	146
4.2.2.4 Calibración	147
4.2.2.5 Mantenimiento	147
4.2.3 Psicrómetro de garita	147
4.2.3.1 Descripción	147
4.2.3.2 Método especial de observación	148
4.2.3.3 Exposición y emplazamiento	148
4.2.4 Psicrómetros de honda o en noria	148
4.2.4.1 Descripción	148
4.2.4.2 Método de observación	148
4.2.5 Psicrómetro calentado	149
4.2.5.1 Descripción	149
4.2.5.2 Método de observación	149
4.2.5.3 Exposición y emplazamiento	149
4.2.6 Psicrómetro de referencia de la OMM	149
4.3 Higrómetro de cabello	150
4.3.1 Consideraciones generales	150
4.3.2 Descripción	151
4.3.3 Método de observación	151
4.3.4 Exposición y emplazamiento	151
4.3.5 Fuentes de error	152
4.3.5.1 Variaciones del cero	152
4.3.5.2 Errores debidos a la contaminación del cabello	152
4.3.5.3 Histéresis	152
4.3.6 Calibración y comparación	152
4.3.7 Mantenimiento	153

4.4	Higrómetro de punto de rocío con espejo enfriado	153
4.4.1	Consideraciones generales	153
4.4.1.1	Teoría	153
4.4.1.2	Principios	153
4.4.2	Descripción	154
4.4.2.1	Equipo sensor	154
4.4.2.2	Equipo de detección óptica	154
4.4.2.3	Equipo de control térmico	155
4.4.2.4	Sistema de visualización de la temperatura	155
4.4.2.5	Sistemas auxiliares	155
4.4.3	Método de observación	156
4.4.4	Exposición y emplazamiento	156
4.4.5	Calibración	157
4.5	Higrómetro de condensación de cloruro de litio calentado (célula de punto de rocío)	157
4.5.1	Consideraciones generales	157
4.5.1.1	Principios	157
4.5.1.2	Descripción	158
4.5.1.3	Sensores con calefacción directa	158
4.5.1.4	Sensores con calefacción indirecta	159
4.5.2	Método operativo	159
4.5.3	Exposición y emplazamiento	160
4.5.4	Fuentes de error	160
4.5.5	Inspección sobre el terreno y calibración	160
4.5.6	Mantenimiento	160
4.6	Higrómetros eléctricos de resistencia y de capacitancia	160
4.6.1	Consideraciones generales	160
4.6.2	Resistencia eléctrica	161
4.6.3	Capacitancia eléctrica	161
4.6.4	Método de observación	161
4.6.5	Exposición y emplazamiento	161
4.6.6	Inspección sobre el terreno y calibración	162
4.6.7	Mantenimiento	162
4.7	Higrómetros de absorción de radiación electromagnética	162
4.8	Seguridad	162
4.9	Instrumentos de referencia y calibración	164
4.9.1	Principios relativos a la calibración de los higrómetros	164
4.9.2	Frecuencia y métodos de calibración	165
4.9.3	Calibración en el laboratorio	165
4.9.4	Patrones primarios	166
4.9.4.1	Higrometría gravimétrica	166
4.9.4.2	Generador dinámico de humedad patrón de dos presiones	166
4.9.4.3	Generador dinámico de humedad patrón de dos temperaturas	166
4.9.5	Patrones secundarios	166
4.9.6	Patrones de trabajo (e instrumentos de referencia sobre el terreno)	167
4.9.7	Psicrómetro de referencia de la OMM	167
4.9.8	Soluciones salinas	167
	ANEXO 4.A. DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DEL VAPOR DE AGUA EN LA ATMÓSFERA	169
	ANEXO 4.B. FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LAS MEDICIONES DE LA HUMEDAD	173
	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	175

CAPÍTULO 4. MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

4.1 GENERALIDADES

La humedad atmosférica, y con frecuencia también su registro continuo, es un parámetro importante en la mayoría de los ámbitos de la actividad meteorológica. En el presente capítulo se considera la medición de la humedad en la superficie terrestre o cerca de ella. Son numerosos los métodos utilizados, y es amplia la documentación sobre el tema. Wexler (1965) ofrece una amplia gama, antigua pero todavía útil, de estas técnicas de medición.

4.1.1 Definiciones

Las definiciones de los términos utilizados en el presente capítulo concuerdan con las del Reglamento Técnico (OMM, 2011a, apéndice B), cuyo texto se reproduce en el anexo 4.A de este capítulo.

Las definiciones simples que más se utilizan para expresar las distintas magnitudes en la medición de la humedad son las siguientes:

Razón de mezcla, r : relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco.

Humedad específica, q : relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire húmedo.

Temperatura del punto de rocío, T_d : temperatura a la cual el aire húmedo, saturado con respecto al agua a una presión dada, tiene una razón de mezcla saturante igual a la razón de mezcla dada.

Humedad relativa, U : coeficiente, expresado en tanto por ciento, entre la tensión de vapor observada y la tensión saturante del vapor con respecto al agua a la misma temperatura y presión.

Tensión de vapor (presión de vapor), e' : presión parcial de vapor de agua en el aire.

Tensiones saturantes del vapor, e'_w y e'_i : presiones de vapor en el aire en estado de equilibrio con la superficie de agua o de hielo, respectivamente.

En el anexo 4.B figuran fórmulas para calcular diversas mediciones de la humedad. Estas versiones de fórmulas y coeficientes fueron adoptadas por la OMM en 1990¹. Son útiles y suficientemente exactas para todas las aplicaciones meteorológicas ordinarias (OMM, 1989a).

Sonntag (1990 y 1994) da fórmulas más exactas y detalladas para estas y otras magnitudes. Se presentan otras fórmulas² detalladas en OMM (1966, introducciones a las tablas 4.8 a 4.10) y en OMM (2011a, apéndice A).

4.1.2 Unidades y escalas

Las unidades y los símbolos que se utilizan normalmente para expresar las magnitudes más usadas en relación con el vapor de agua en la atmósfera son las siguientes:

- a) la razón de mezcla, r , y la humedad específica, q (en kilogramos por kilogramo);
- b) la presión de vapor en el aire, e' , e'_w , e'_i , así como la presión, p (en hectopascales);

¹ Resolución 6 (EC-XLII), aprobada por el Consejo Ejecutivo en su 42ª reunión.

² Resolución 19 (Cg-IV), aprobada por el Cuarto Congreso Meteorológico Mundial.

- c) la temperatura, T ; la temperatura del termómetro húmedo, T_w ; la temperatura del punto de rocío, T_d ; y la temperatura del punto de escarcha T_f (en kelvines);
- d) la temperatura, t ; la temperatura del termómetro húmedo, t_w ; la temperatura del punto de rocío, t_d ; y la temperatura del punto de escarcha t_f (en grados Celsius);
- e) la humedad relativa, U (en porcentaje).

4.1.3 **Requisitos meteorológicos**

Las mediciones de humedad en la superficie terrestre sirven para el análisis y la predicción meteorológicos, para los estudios climatológicos y, en general, para muchas otras aplicaciones especiales en hidrología, agricultura, servicios aeronáuticos y estudios medioambientales. También tienen gran importancia por su vinculación con los cambios del estado del agua en la atmósfera.

En el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) se detallan los requisitos generales relativos al rango, la resolución y la exactitud de las mediciones de la humedad. Los grados de incertidumbre alcanzables que figuran en el cuadro se refieren a instrumentos de buena calidad, que son utilizados y mantenidos adecuadamente. En la práctica, no es fácil lograr esa exactitud. En particular, el psicrómetro en una garita meteorológica sin ventilación forzada, muy utilizado todavía, dista mucho de alcanzar la exactitud deseada.

En las mediciones de humedad, las constantes de tiempo del orden de 1 minuto son adecuadas para la mayoría de las aplicaciones. Los tiempos de respuesta fácilmente alcanzables con instrumentos de buen funcionamiento se examinan en la sección 4.1.4.9.

4.1.4 **Métodos de medición**

Sonntag (1994) proporciona un estudio general de los avances más recientes en el campo de la higrometría.

4.1.4.1 **Higrómetros**

Todo instrumento utilizado para medir la humedad se denomina higrómetro. Los principios físicos que más se aplican en higrometría se indican en las secciones 4.1.4.4 a 4.1.4.8. Para obtener más información sobre los diversos métodos, véase Wexler (1965). En OMM (1989b) figura el informe de una comparación internacional de la OMM sobre diversos tipos de higrómetros.

4.1.4.2 **Exposición: comentarios generales**

Las condiciones generales para la exposición de los sensores de humedad son similares a las de los sensores de temperatura y, por lo tanto, puede utilizarse para tal fin una garita meteorológica emplazada adecuadamente. En cuanto a las condiciones particulares, es necesario:

- a) proteger el instrumento de la radiación solar directa, de los contaminantes atmosféricos, de la lluvia y del viento;
- b) evitar la formación de un microclima local en la estructura de la garita del sensor o en el dispositivo de muestreo; cabe señalar que la madera y numerosos materiales sintéticos adsorben o pierden vapor de agua en relación con la humedad atmosférica.

La exposición adecuada para cada instrumento se describe en las secciones 4.2 a 4.7.

En la clasificación de emplazamientos de las estaciones terrestres de observación en superficie (véase el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.B) de la presente Guía) se proporcionan más orientaciones sobre la selección de un emplazamiento y la ubicación de un higrómetro en un emplazamiento a los fines de optimizar la representatividad.

4.1.4.3 **Fuentes de error: comentarios generales**

Los errores en las mediciones de la humedad pueden deberse a las siguientes causas:

- a) la modificación de la muestra de aire, por ejemplo, por la presencia de fuentes o sumideros de calor o de vapor de agua;
- b) la contaminación del sensor, por ejemplo, por el polvo y los rociones de mar;
- c) los errores de calibración, incluida la corrección de la presión, el coeficiente de temperatura del sensor y la interfaz eléctrica;
- d) el tratamiento inadecuado en las fases líquida y sólida (del agua);
- e) el diseño inadecuado del instrumento, por ejemplo, conducción de calor por el tubo del termómetro húmedo;
- f) las fallas de funcionamiento, por ejemplo, no se puede alcanzar un equilibrio estable;
- g) los intervalos de muestreo o de establecimiento de la media, o de ambos, son inadecuados.

Es necesario que haya coherencia entre la constante de tiempo del sensor, el intervalo de tiempo para calcular la media y las necesidades relativas a los datos.

Las causas de error mencionadas se aplican de modo diferente a los diversos sensores de humedad. En las secciones pertinentes de este capítulo figuran más detalles al respecto.

4.1.4.4 **Higrometría gravimétrica**

Este método se basa en la absorción, por un desecante, del vapor de agua contenido en un volumen de aire conocido (higrómetro gravimétrico, utilizado solo para patrones primarios). En la sección 4.9 se dan algunos detalles.

El método gravimétrico permite obtener una medición absoluta del vapor de agua contenido en una muestra de aire, en términos de su razón de mezcla de humedad. Se trata, en primer lugar, de extraer el vapor de agua que contiene la muestra. Para obtener la masa del vapor de agua se pesa el agente desecante antes y después de absorber el vapor. La masa de la muestra seca se puede calcular pesando o midiendo su volumen.

El método se utiliza exclusivamente para obtener un patrón de calibración absoluto que sirva de referencia; este tipo de instrumento se encuentra sobre todo en los laboratorios nacionales de calibración.

4.1.4.5 **Métodos basados en la condensación**

4.1.4.5.1 **Método del espejo enfriado (higrómetro de punto de rocío o de punto de escarcha)**

Cuando el aire húmedo a una temperatura T , presión p y razón de mezcla r_w (o r_i) se enfría, alcanza su punto de saturación con respecto al agua (o al hielo a temperaturas más bajas),

y se puede detectar sobre una superficie sólida no higroscópica un depósito de rocío (o de escarcha). La temperatura de este punto de saturación es la temperatura del punto de rocío T_d (o del punto de escarcha T_p).

El higrómetro de espejo enfriado sirve para medir la T_d o la T_p . Los sistemas más utilizados emplean una pequeña superficie reflectora de metal pulido, enfriada con un dispositivo electrónico de efecto Peltier, y un detector óptico de la condensación.

Los instrumentos que utilizan el método de condensación se usan con fines de observación, pero también pueden servir de patrón de trabajo o de referencia (véase la sección 4.4).

4.1.4.5.2 **Método de solución salina calentada (higrómetro de vapor en equilibrio, llamado célula de punto de rocío)**

La presión de vapor en equilibrio en la superficie de una solución salina saturada es inferior a la de una superficie similar de agua pura a la misma temperatura. Este efecto se observa en todas las soluciones salinas, pero sobre todo en el cloruro de litio, cuya presión de vapor en equilibrio es excepcionalmente baja.

Una solución acuosa salina (cuya presión de vapor en equilibrio sea inferior a la presión del vapor ambiente) puede calentarse hasta alcanzar una temperatura a la cual la presión del vapor en equilibrio exceda a la presión del vapor ambiente. En este punto, el equilibrio pasará de la condensación a la evaporación y, por último, a una fase de transición de la solución líquida a una forma de hidrato sólido (cristalina). El punto de transición puede detectarse por una disminución característica de la conductividad eléctrica de la solución cuando esta se cristaliza. La presión del vapor ambiente se deduce de la temperatura de la solución a la que se alcanza esa presión del vapor ambiente. Para ello, se coloca un termómetro en la solución, asegurándose de que se establezca un buen contacto térmico. El punto de rocío ambiente (es decir, con respecto a una superficie plana de agua pura) puede determinarse con datos empíricos, estableciendo la relación entre la presión de vapor y la temperatura del agua pura y de las soluciones salinas. El cloruro de litio es la solución salina más utilizada para este tipo de sensor.

Este método se emplea con fines de observación, especialmente en las estaciones meteorológicas automáticas (véase la sección 4.5).

4.1.4.6 **Método psicrométrico**

Un psicrómetro consiste básicamente en dos termómetros juntos; el elemento sensible de uno de los termómetros está cubierto de una fina capa de agua o de hielo, de ahí el término de termómetro húmedo o termómetro congelado. El elemento sensible del segundo termómetro está simplemente expuesto al aire y se llama termómetro seco. Este método se sigue utilizando con frecuencia, y se describe con detalle en la sección 4.2.

Debido a la evaporación del agua en el termómetro húmedo, este por lo general indica una temperatura inferior a la del termómetro seco. La diferencia entre las temperaturas obtenidas con ambos termómetros es una medida de la humedad del aire; cuanto más baja sea la humedad ambiente, más alta será la tasa de evaporación y, por lo tanto, mayor será la diferencia entre los dos termómetros, o sea la diferencia psicrométrica. La relación entre la diferencia psicrométrica y la humedad ambiente se expresa mediante una fórmula psicrométrica.

Este método se emplea mucho con fines de observación. Los instrumentos que utilizan el método psicrométrico se utilizan también con frecuencia como patrones de trabajo.

4.1.4.7 **Métodos de sorción**

Ciertos materiales interactúan con el vapor de agua y sufren, en sus propiedades químicas o físicas, un cambio suficientemente reversible para ser utilizado como sensor de la humedad

ambiente. Estos materiales pueden adsorber o absorber el vapor de agua, siendo la adsorción la fijación de una sustancia en la superficie de otra, mientras que la absorción es la penetración de la sustancia en el cuerpo de otra. Una característica de las sustancias higroscópicas es que absorben el vapor de agua que se encuentra en la atmósfera circundante, debido a que tienen una tensión saturante de vapor inferior a la del aire circundante. Para que el fenómeno de absorción se produzca, es necesario que la presión del vapor ambiente de la atmósfera sea superior a la tensión saturante de vapor de la sustancia. A continuación se describen dos propiedades de la sorción:

- a) Cambios de las dimensiones de los materiales higroscópicos: algunos materiales cambian dimensionalmente en función de la humedad. Las fibras naturales tienden a presentar proporcionalmente las mayores variaciones, y es posible utilizarlas en un transductor analógico de desplazamiento lineal si se las acopla a un sistema mecánico de palancas. Este transductor debe estar diseñado de tal modo que origine el desplazamiento de un indicador en una escala que permita la visualización, o puede ser un dispositivo electromecánico que transforme la variación de la distancia en respuesta eléctrica.

El cabello humano es el material más utilizado para este tipo de higrómetro. Se pueden utilizar también fibras sintéticas, pero en vista de que el tiempo de respuesta de estas fibras es muy largo, no se debe emplear el higrómetro de fibras sintéticas a temperaturas inferiores a 10 °C. El higrómetro de cabello se describe en la sección 4.3.

Las membranas orgánicas que se obtienen de las tripas de animales domésticos, como por ejemplo la membrana de tripa de vacuno, tienen propiedades similares al cabello y se han utilizado para la medición de la humedad, pero sobre todo para instrumentos de medición en altitud.

- b) Cambios en las propiedades eléctricas de los materiales higroscópicos: las propiedades eléctricas de ciertos materiales higroscópicos varían en función de la humedad relativa ambiente, y no presentan una gran dependencia térmica. Los métodos más utilizados basados en estas propiedades se describen en la sección 4.6.

Los sensores eléctricos de la humedad relativa se utilizan cada vez más en aplicaciones que exigen una lectura remota, en especial cuando se requiere la visualización directa de la humedad relativa.

Para las mediciones de la humedad relativa se emplean generalmente la resistencia eléctrica, en el caso de los sensores fabricados con material plástico tratado químicamente con una superficie conductora, y la capacidad eléctrica, si se trata de sensores cuyo funcionamiento se basa en la variación de las propiedades dieléctricas de un sólido higroscópico en función de la humedad relativa ambiente.

4.1.4.8 ***Absorción de la radiación electromagnética por el vapor de agua (higrómetros de absorción de rayos ultravioletas e infrarrojos)***

Las moléculas de agua absorben la radiación electromagnética en un intervalo de bandas de onda y de longitudes de onda específicas. Es posible servirse de esta propiedad para obtener la medida de la concentración molecular del vapor de agua en un gas. Las regiones del espectro electromagnético más apropiadas para este tipo de aplicación son las del ultravioleta y el infrarrojo. El principio del método consiste en determinar la atenuación de la radiación en una banda de ondas que corresponda a la absorción del vapor de agua en el trayecto entre una fuente de radiación y un dispositivo receptor. Existen dos métodos principales para determinar el grado de atenuación de la radiación, a saber:

- a) la transmisión de una radiación de banda estrecha y de intensidad fija a un receptor calibrado;
- b) la transmisión de una radiación en dos longitudes de onda, una que es fuertemente absorbida por el vapor de agua, y la otra que no es absorbida o lo es muy levemente.

Ambos tipos de instrumentos requieren calibraciones frecuentes y resultan más convenientes para medir variaciones, más que niveles absolutos, de la concentración de vapor. Solo se utilizan con fines de investigación; en la sección 4.7 se describen brevemente tales instrumentos.

4.1.4.9 **Constantes de tiempo de los sensores de humedad**

Para determinar la constante de tiempo de un sensor de humedad, el tiempo de respuesta del sensor a un cambio brusco de la humedad debe corresponder a una función conocida. En general, el término se refiere al tiempo que necesita el sensor para indicar el 63,2% ($1/e$) de una variación brusca en la escala de la magnitud que debe medirse (en este caso la humedad), considerando que el sensor da una respuesta de primer orden a la variación de la magnitud que se mide (es decir, la velocidad a la que varía la medición es proporcional a la diferencia entre la magnitud medida y la sometida a la medición). De este modo, es posible prever que el 99,3% de la variación se producirá al cabo de un período cuya duración corresponde a cinco veces la constante de tiempo.

En el cuadro 4.1 figuran los valores de la constante de tiempo ($1/e$) para diversos tipos de sensores de humedad.

Cuadro 4.1. Constantes de tiempo de los sensores de humedad

85% de humedad relativa Tipo de sensor	Constante de tiempo $1/e$ (s)		
	20 °C	0 °C	-20 °C
Cabello humano ordinario	32	75	440
Cabello asilado	10	10	12
Membrana orgánica de tripa de vacuno	10	16	140
Capacidad eléctrica	1-10	1-10	1-10
Resistencia eléctrica	1-10	—	—
Psicrómetro de Assmann	30-50	30-50	30-50
Higrómetros de condensación			
Higrómetros electrolíticos			
Higrómetro óptico	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Nota: La relación de primer orden no puede verificarse bien, sobre todo en el caso de sensores de sorción, puesto que el factor de forzamiento para el equilibrio del vapor, es decir, el gradiente local de la presión de vapor, depende de la migración local de las moléculas del vapor de agua en el cuerpo de un elemento sensible a la humedad. En general, la respuesta de primer orden será la que proporcionen los sensores que dispongan de un elemento activo fino.

4.1.4.10 **Mantenimiento: comentarios generales**

Deberían tenerse en cuenta los siguientes procedimientos de mantenimiento:

- Limpieza: los sensores y sus cubiertas deberían mantenerse limpios. Algunos sensores, como el higrómetro de espejo enfriado y el de cabello, deben limpiarse periódicamente con agua destilada. Otros, especialmente los que tienen un revestimiento electrolítico, pero también los que contienen un sustrato polimérico, no se deben limpiar de esta manera. Por lo tanto, es esencial dar instrucciones claras y precisas al respecto a los observadores y al personal de mantenimiento.

- b) Verificación y calibración de los instrumentos utilizados sobre el terreno: todos los sensores utilizados sobre el terreno necesitan calibración periódica. En los psicrómetros y en los higrómetros de punto de rocío equipados con un detector de temperatura, la calibración de este detector podrá controlarse durante cada revisión periódica. Se realizará también una comparación con un higrómetro de trabajo de referencia, como el psicrómetro de Assmann, al menos una vez al mes.

Es posible utilizar soluciones salinas saturadas para verificar los sensores que solo necesitan una muestra de pequeño volumen. Durante la verificación se requiere una temperatura ambiente constante, y resulta difícil fiarse de su eficacia sobre el terreno.

Por otra parte, un psicrómetro de aspiración de tipo estándar, como el de Assmann, utilizado como patrón de trabajo, tiene la ventaja de que su propia integridad puede verificarse mediante la comparación de los termómetros seco y húmedo que lo componen, y de que se puede esperar una aspiración adecuada cuando el aspirador es robusto y de buen tamaño. El instrumento de referencia puede, a su vez, calibrarse a intervalos adecuados en función del tipo de instrumento.

Es importante verificar la calibración de las interfaces eléctricas periódicamente y en todo su rango de funcionamiento. Para este fin, puede utilizarse un simulador en lugar del sensor. Sin embargo, siempre será necesario calibrar todo el conjunto en puntos seleccionados, debido a que la combinación de los errores de calibración del sensor y de la interfaz podría discrepar de las especificaciones del conjunto, aun cuando correspondieran a las especificaciones de cada instrumento por separado.

Las exigencias detalladas específicas para el mantenimiento de cada tipo de higrómetro descrito en este capítulo figuran en las secciones correspondientes.

4.1.4.11 **Filtros de protección**

En general, los sensores de humedad llevan un filtro para protegerlos contra los contaminantes que pudieran reducir su rendimiento. Cuando un sensor no se ventila artificialmente, el uso de un filtro tiende a reducir la velocidad de respuesta, impidiendo que el aire circule libremente y permitiendo que el vapor de agua entre en contacto con el elemento sensible por difusión molecular a través del material del filtro. Si bien la difusión del vapor de agua a través de algunos materiales, como los productos de celulosa, es en teoría más rápida que a través del aire en calma, la práctica muestra que las mejores velocidades de difusión se obtienen a través de las membranas porosas hidrófobas. El tamaño de los poros debe ser lo suficientemente pequeño para que el filtro atrape las partículas de aerosoles perjudiciales (en un ambiente marino, se pueden encontrar grandes cantidades de partículas de sal marina cuyo diámetro mínimo puede llegar a $0,1 \mu\text{m}$), y la porosidad debería ser suficiente para permitir una velocidad de difusión adecuada.

El tamaño del filtro, así como su porosidad, determinan la velocidad de difusión total. La aspiración mejora la difusión, pero cabe recordar que esta técnica consiste en mantener una débil presión de aire sobre el lado sensible del filtro y que esto puede influir considerablemente en la medición.

En general, es conveniente proteger los sensores no ventilados con un material inerte e hidrófobo. Con este fin, en diversas situaciones se han utilizado con buenos resultados membranas de polímero muy porosas, fabricadas con un tipo de politetrafluoroetileno dilatado que las hace relativamente sólidas.

Se pueden utilizar filtros de metal sinterizado, pero conviene calentarlos para evitar cualquier problema de condensación. Esto no es normalmente apropiado para los sensores de humedad relativa, pero sí para los sensores de punto de rocío. Los filtros de metal sinterizado son sólidos y muy apropiados para aplicaciones que requieren aspiración, las cuales permiten utilizar filtros de gran superficie y, en consecuencia, una diferencia de presión aceptablemente pequeña.

Si la difusión no se refuerza mediante aspiración artificial se deberá tener en cuenta la relación entre la superficie del filtro y el volumen de aire del muestreo del sensor. En el caso de un sensor de sorción típico, compuesto por un sustrato plano, la configuración óptima será una membrana plana situada cerca de la superficie del sensor. Si se trata de una superficie sensible cilíndrica, se utilizará un filtro cilíndrico.

4.2 PSICRÓMETRO

4.2.1 Consideraciones generales

4.2.1.1 Fórmulas y tablas psicrométricas

En los siguientes párrafos se resumen los métodos empleados actualmente para establecer las tablas psicrométricas.

Generalmente, la presión de vapor e' en las condiciones de observación se obtiene mediante las siguientes fórmulas psicrométricas semiempíricas:

$$e' = e'_w(p, T_w) - Ap(T - T_w) \quad (4.1)$$

y:

$$e' = e'_i(p, T_i) - Ap(T - T_i) \quad (4.2)$$

donde e'_w es la tensión saturante del vapor con respecto al agua a la temperatura T_w y a la presión p del termómetro húmedo; e'_i es la tensión saturante del vapor con respecto al hielo a la temperatura T_i y a la presión p del termómetro congelado; p es la presión del aire; T es la temperatura del termómetro seco; y A es el coeficiente psicrométrico (se prefiere esta denominación a la errónea de "constante psicrométrica").

Para la mayoría de los instrumentos, la temperatura T_w del termómetro húmedo no corresponde a la temperatura termodinámica del termómetro húmedo definida en el anexo 4.A, que depende únicamente de p , T y r (la razón de mezcla de humedad). La temperatura medida con un termómetro húmedo depende también de algunas variables que están influenciadas por procesos dinámicos de transferencia térmica a través de una interfase líquido/gas (donde el gas se caracteriza por las capas laminares y turbulentas que lo componen). La descripción de un modelo termodinámico satisfactorio va más allá del ámbito de la presente publicación. En la práctica, el coeficiente psicrométrico A , que se determina de manera empírica, elimina la diferencia entre la temperatura termodinámica y la temperatura medida con el termómetro húmedo (véase la sección 4.2.6).

En general, el coeficiente A depende del diseño del psicrómetro (sobre todo para el sistema del termómetro húmedo), del flujo de aire que pasa por el termómetro húmedo (denominado índice de ventilación), de la temperatura y de la humedad del aire. Si el índice de ventilación es bajo, A dependerá principalmente de ese índice de ventilación. Sin embargo, cuando el índice de ventilación sea de 3 a 5 m s⁻¹ (para termómetros de tamaño normal) o más, el valor de A dependerá mucho menos del índice de ventilación y será prácticamente el mismo para los psicrómetros bien diseñados. El valor de A no depende mucho de la temperatura ni de la humedad, y su dependencia con respecto a estas variables se considera generalmente insignificante. El valor de A es menor cuando el termómetro húmedo está recubierto de hielo que cuando está recubierto de agua.

En las secciones siguientes se examinan las fórmulas y los coeficientes adecuados que se aplican a los diversos tipos de psicrómetros.

4.2.1.2 **Características de un psicrómetro**

El equipo utilizado para efectuar observaciones psicrométricas debería, en la medida de lo posible, conformarse a las recomendaciones siguientes (véanse las secciones 4.2.3 y 4.2.6):

- a) A nivel del mar, y si los termómetros utilizados son como los que se emplean generalmente en las estaciones meteorológicas, el aire debería aspirarse a una velocidad no inferior a $2,2 \text{ m s}^{-1}$ ni superior a 10 m s^{-1} . Para altitudes considerablemente distintas, estas velocidades límite del aire tendrían que ajustarse en proporción inversa a la densidad de la atmósfera.
- b) Se deben proteger los termómetros secos y húmedos de los efectos de la radiación, preferentemente con un mínimo de dos pantallas. En el caso de un psicrómetro con ventilación forzada, como el de Assmann, las pantallas deben ser de metal pulido y sin pintar, separadas del resto del aparato por materiales aislantes. El material aislante térmico es preferible, en principio, e indispensable en el caso de psicrómetros con ventilación natural.
- c) Si el psicrómetro está protegido por una garita con paredes de celosía y dotado de ventilación forzada, son necesarios conductos de ventilación separados para los dos termómetros. La entrada de los conductos estará situada de manera que los termómetros puedan medir la temperatura real ambiente, y su salida estará por encima de la garita a fin de evitar la recirculación del aire evacuado.
- d) Conviene tomar todas las precauciones necesarias para impedir cualquier transferencia térmica significativa del motor de aspiración a los termómetros.
- e) El recipiente de agua y la mecha estarán dispuestos de modo que el agua llegue al termómetro húmedo a la misma temperatura de este sin influir sobre la temperatura del termómetro seco.

4.2.1.3 **Manguito del termómetro húmedo**

Por lo general, el termómetro húmedo tiene una mecha de algodón, u otro material similar, bien ajustada alrededor del elemento sensible para mantener una cubierta uniforme de agua, que se aplica directamente o por capilaridad a partir de un recipiente de agua. La mecha tiene normalmente la forma de un manguito, bien ajustado alrededor del termómetro húmedo, y rebasa por lo menos en 2 cm el extremo superior del tubo del termómetro.

El material utilizado para cubrir el termómetro húmedo debe ser fino pero tupido. Antes de instalarlo, hay que lavarlo cuidadosamente con una solución acuosa de bicarbonato de sodio (NaHCO_3), diluida a razón de 5 g por litro, y enjuagarlo varias veces con agua destilada. Puede lavarse también con una solución de detergente puro y agua. Si se utiliza una mecha, se le debe dar un tratamiento análogo.

Cualquier contaminación visible de la mecha o del manguito del termómetro húmedo debería ser considerada una clara indicación de la necesidad de sustituirlo. En el manejo de la mecha y del manguito conviene proceder con gran cuidado para impedir la contaminación proveniente de las manos. Para el termómetro húmedo debería utilizarse agua destilada.

El mantenimiento adecuado del termómetro húmedo es muy importante. Se debería pedir a los observadores que cambien el manguito y la mecha periódicamente. Las sustituciones deben realizarse al menos una vez a la semana en todos los psicrómetros continuamente expuestos y, en lugares próximos al mar o en zonas polvorientas o industriales, puede ser necesario cambiar ambas partes con mayor frecuencia. Se requiere comprobar frecuentemente el depósito de agua y sustituirlo o completarlo en caso necesario.

En tiempo seco y caluroso puede ser conveniente humedecer la cubierta con agua a partir de un recipiente poroso. Así, el agua se enfriará por la evaporación que se produce en la superficie del material poroso antes de llegar al termómetro. Convendría mantener el recipiente a la sombra, pero no muy cerca del psicrómetro.

4.2.1.4 **Funcionamiento del termómetro húmedo por debajo del punto de congelación**

Si bien es difícil emplear el psicrómetro a temperaturas inferiores al punto de congelación, se utiliza en regiones donde se registran esas temperaturas. Cuando la temperatura del termómetro húmedo no llega a 0 °C, no es posible utilizar una mecha para transferir agua por capilaridad desde un depósito al manguito de dicho termómetro. En esas condiciones, solo debe formarse una delgada capa de hielo alrededor del manguito. Es indispensable ventilar artificialmente los termómetros, de lo contrario, será muy difícil utilizar el termómetro húmedo.

El agua utilizada debería tener, en la medida de lo posible, una temperatura próxima al punto de congelación. Si se forma una capa de hielo espeso en la parte inferior del termómetro, este debe sumergirse en el agua hasta que se derrita el hielo.

El tiempo necesario para que el termómetro húmedo alcance una lectura constante, una vez empapado el manguito, depende de la ventilación y de la temperatura real del termómetro húmedo. Un termómetro sin ventilar requiere generalmente de 15 a 45 minutos, mientras que un termómetro aspirado necesitará mucho menos tiempo. Es esencial que la nueva película de hielo sobre el bulbo del termómetro se forme en el momento oportuno. Si se hacen observaciones horarias con un psicrómetro simple, será preferible que se forme una nueva capa de hielo justamente después de cada observación. Si las observaciones se llevan a cabo a intervalos más largos, el observador tendría que visitar la garita antes de cada observación, con el tiempo suficiente para permitir que se forme una nueva película de hielo sobre el bulbo del termómetro. El termómetro húmedo de los psicrómetros aspirados y de los psicrómetros de honda debería mojarse inmediatamente antes de su uso.

Puede evitarse o retardarse la evaporación de la película de hielo encerrando el termómetro húmedo en un pequeño tubo de vidrio, o impidiendo la entrada de aire entre cada observación (esta última operación no debería realizarse si entraña el riesgo de que se recaliente el ventilador).

Con respecto al efecto del agua subfundida sobre el termómetro húmedo puede procederse de dos maneras:

- a) Utilizar diferentes tablas según el termómetro húmedo tenga una capa de hielo o esté cubierto de agua subfundida. Para averiguar qué tabla ha de usarse, debe tocarse el termómetro húmedo con un cristal de nieve, un lápiz u otro objeto, inmediatamente después de cada observación. Si la temperatura sube a 0 °C, y después comienza a bajar otra vez, se puede suponer que el agua del termómetro húmedo estaba subfundida en el momento de la observación.
- b) Utilizar una tabla apropiada para un termómetro húmedo recubierto de hielo, y favorecer el congelamiento del agua subfundida de la misma manera que para el método descrito en el apartado a). Para ahorrar tiempo y tener la seguridad de que el termómetro húmedo esté cubierto de hielo, el observador deberá procurar iniciar la congelación del agua en cada observación lo antes posible, después de humedecer el bulbo del termómetro. Según el comportamiento del termómetro húmedo en el punto de congelación, generalmente se puede determinar si el bulbo está cubierto de hielo o de agua subfundida. No obstante, el procedimiento recomendado es iniciar la congelación del agua en cada observación cuando se supone que la temperatura del termómetro húmedo está por debajo de 0 °C, tanto si se observa o no la reacción del termómetro después de haberlo mojado.

Aunque el primer método suele ser más rápido, implica el empleo de dos tablas, y esto puede causar cierta confusión.

4.2.1.5 **Método general de observación**

Sería conveniente seguir los procedimientos que figuran en el capítulo 2 de la parte I, relativos a la medición de la temperatura, además de los que se reseñan a continuación:

- a) Si hay que cambiar el manguito, la mecha o el agua del termómetro húmedo, debería hacerse bastante antes de la observación. El lapso de tiempo que requiere el termómetro húmedo para indicar la temperatura apropiada depende del tipo de psicrómetro.
- b) La lectura de los termómetros se redondeará a la décima de grado más próxima.
- c) Siempre que sea posible, conviene leer simultáneamente los dos termómetros durante la observación; el observador debería cerciorarse de que el termómetro húmedo reciba suficiente agua.

4.2.1.6 **Utilización de termómetros de resistencia eléctrica**

Los termómetros de precisión con resistencia eléctrica de platino son muy utilizados en lugar de los termómetros de mercurio en cápsula de vidrio, sobre todo para las aplicaciones que requieren una lectura remota y una medición continua. Los aparatos, y los circuitos eléctricos de interfaz seleccionados, deben cumplir los criterios de funcionamiento que se describen en el capítulo 2 de la parte I. Conviene tener mucho cuidado con el efecto de calentamiento espontáneo en los termómetros eléctricos.

Las fórmulas psicrométricas que se emplean para los aspiripsicrómetros de Assmann que figuran en el anexo 4.B son igualmente aplicables cuando se utilizan termómetros con resistencia de platino en lugar de termómetros de mercurio en cápsula de vidrio, teniendo en cuenta que la configuración de los elementos y los termómetros es diferente. La fórmula que se utiliza para el termómetro húmedo (agua) se aplica también a varios psicrómetros con ventilación transversal (OMM, 1989a).

4.2.1.7 **Fuentes de error**

Las principales fuentes de error a tener en cuenta son las siguientes:

- a) Errores de índice de los termómetros: al efectuar mediciones psicrométricas es muy importante conocer los errores de índice de los termómetros para todo el intervalo real de temperaturas y aplicar a las lecturas la corrección adecuada para esos errores antes de utilizar las tablas de humedad.

Cualquier otro error en la temperatura del termómetro húmedo o del termómetro cubierto de hielo causado por otros efectos tomará la misma forma que los errores de índice.

El cuadro 4.2 muestra, en porcentajes y para un intervalo de temperaturas reales del aire (suponiendo que el termómetro seco registra la temperatura real del aire), el error $\varepsilon(U)$ que ocasiona, en la medición de la humedad relativa, un error $\varepsilon(t_x)$ de 0,5 K y 0,1 K, respectivamente, en las lecturas de la temperatura del termómetro húmedo y del termómetro cubierto de hielo, en donde x representa el agua para $t > 0$ °C o el hielo para $t < 0$ °C, y siendo la humedad relativa, U , del 50%.

- b) Coeficientes de retardo del termómetro: para obtener la máxima exactitud del psicrómetro es conveniente disponer lo necesario para que los termómetros seco y húmedo tengan, aproximadamente, el mismo coeficiente de retardo; si el bulbo de los termómetros es del mismo tamaño, el termómetro húmedo tendrá un coeficiente de retardo mucho menor que el termómetro seco.

Cuadro 4.2. Error en la deducción de la humedad relativa, resultante de errores de índice $\varepsilon(t_x)$ de un termómetro húmedo o cubierto de hielo, para $U = 50\%$

Temperatura del aire en °C	Error en la humedad relativa, $\varepsilon(U)$ en % debido a un error en la medición del termómetro húmedo o cubierto de hielo	
	$\varepsilon(t_x) = 0,5 K$	$\varepsilon(t_x) = 0,1 K$
-30	60	12
-20	27	5
-10	14	3
0	8	2
10	5	1
20	4	0,5
30	3	0,5
40	2	0,5
50	2	0

- c) Errores relacionados con la ventilación: los errores debidos a una ventilación insuficiente pueden ser mucho más graves si se utilizan tablas de humedad inadecuadas (véanse las secciones sobre los diversos tipos de psicrómetros).
- d) Errores debidos a una capa de hielo excesiva sobre el termómetro húmedo: una capa espesa de hielo sobre el bulbo aumenta el retardo del termómetro, por lo tanto, se debería eliminar ese hielo inmediatamente sumergiendo el termómetro en agua destilada.
- e) Errores debidos a la contaminación del manguito del termómetro húmedo o a las impurezas del agua: la presencia de sustancias que modifican la presión del vapor de agua podría causar errores importantes. El termómetro húmedo y su manguito deberían lavarse a intervalos regulares en agua destilada para eliminar las impurezas solubles, siendo necesario efectuar esta operación con mayor frecuencia en ciertas regiones, como las zonas próximas al mar o las sometidas a contaminación atmosférica.
- f) Errores debidos a la conducción térmica desde el tubo hasta el bulbo del termómetro húmedo: la conducción del calor del tubo al bulbo del termómetro húmedo reduce la diferencia psicrométrica, obteniéndose de esta manera valores demasiado altos de la humedad relativa. El efecto es más pronunciado en caso de humedad relativa baja, pero se puede eliminar si el manguito que cubre el bulbo del termómetro húmedo rebasa al menos en 2 cm el tubo del termómetro.

4.2.2 **Aspiropsicrómetro de Assmann**

4.2.2.1 **Descripción**

Este psicrómetro está compuesto de dos termómetros de mercurio montados verticalmente, uno al lado del otro, en un marco metálico cromado o niquelado pulido, conectados por conductos a un ventilador que funciona mediante un resorte o un motor eléctrico. El bulbo de uno de los termómetros tiene una mecha de muselina bien ajustada que se humedece con agua destilada antes de utilizar el termómetro. Cada uno de los termómetros se coloca en dos tubos metálicos coaxiales, muy pulidos por dentro y por fuera, que protegen los bulbos contra la radiación térmica externa. Todos los tubos están separados entre sí por un aislante térmico.

Una comparación internacional de psicrómetros de Assmann utilizados en 10 países, organizada por la OMM (OMM, 1989a), mostró una buena concordancia entre las mediciones de las

temperaturas del termómetro húmedo y el termómetro seco realizadas con psicrómetros cuyas dimensiones se aproximan a las especificaciones de origen, y cuando la velocidad del aire aspirado es superior a $2,2 \text{ m s}^{-1}$. Algunos aparatos disponibles en el comercio no responden totalmente a esos criterios. Un estudio más detallado se encuentra en OMM (1989a). Sobre el terreno, el psicrómetro de Assmann permite alcanzar la exactitud mencionada en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) de la presente Guía, y podría llegar a mejorarse significativamente si la medición se realiza con mucho cuidado.

En el anexo 4.B figura una lista de fórmulas normalizadas para calcular la humedad a partir de mediciones realizadas con el psicrómetro de Assmann³, las cuales constituyen la base de otros tipos de psicrómetros de ventilación artificial dado que no existen mejores alternativas.

4.2.2.2 **Método de observación**

La mecha, que debería estar totalmente libre de grasa, se humedece con agua destilada, y habría de cambiarse cuando esté sucia o endurecida. El agua transportada por la mecha no debería entrar en contacto con la pantalla de protección contra la radiación.

Se controlará que las columnas de mercurio de los termómetros no estén fraccionadas y, cuando suceda, sería necesario corregir esa irregularidad o sustituir el termómetro.

El psicrómetro funciona normalmente con los termómetros en posición vertical. El tubo del termómetro se debe proteger de los efectos de la radiación solar girando el instrumento de manera que las pantallas laterales se encuentren en dirección al sol. Conviene inclinar el psicrómetro de manera que los orificios de aspiración queden situados en dirección al viento, teniendo siempre cuidado de no exponer los bulbos de los termómetros a la radiación solar. Cuando el viento sea fuerte y pueda afectar al funcionamiento del ventilador, se debería utilizar una pantalla de protección.

El psicrómetro debería encontrarse a la misma temperatura que el aire circundante. Si la temperatura del aire es superior a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, después de la aspiración se tendrían que tomar al menos tres medidas a intervalos de 1 minuto. Si la temperatura es inferior a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, habría que esperar a que termine el proceso de congelación y observar si la mecha está cubierta de agua o de hielo. Durante los procesos de congelación y deshielo la temperatura del termómetro húmedo se mantiene constante a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Si la medición se lleva a cabo al aire libre, conviene repetir la operación varias veces y tomar como resultado la media de los valores obtenidos. Los termómetros deberían leerse con una resolución de $0,1 \text{ K}$ o mejor.

El método de observación puede resumirse de la siguiente manera:

- a) humedecer el termómetro húmedo;
- b) dar cuerda al motor del sistema de relojería (o poner en funcionamiento el motor eléctrico);
- c) esperar 2 o 3 minutos, o hasta que la lectura del termómetro húmedo se estabilice;
- d) leer el termómetro seco;
- e) leer el termómetro húmedo;
- f) verificar la lectura del termómetro seco.

4.2.2.3 **Exposición y emplazamiento**

Las observaciones con el psicrómetro deberían efectuarse al aire libre, manteniendo el instrumento colgado de un gancho o unido por un soporte adecuado a un poste delgado, o

³ Recomendada por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación en su décima reunión (1989).

manteniéndolo con una mano y el brazo estirado, con los conductos de aire apenas inclinados en dirección del viento. Estos orificios tendrían que encontrarse a una altura de entre 1,25 y 2 m por encima del nivel del terreno para las mediciones normales de la temperatura y de la humedad del aire.

Se debería hacer todo lo posible para que la presencia del observador u otra fuente cercana de calor o de vapor de agua, como el tubo de escape de un vehículo de motor, no influya en las lecturas.

4.2.2.4 **Calibración**

Debería verificarse periódicamente el sistema de ventilación, por lo menos una vez al mes.

Asimismo, sería necesario controlar periódicamente la calibración de los termómetros. Es posible comparar uno con otro midiendo con ambos la temperatura del termómetro seco. Debería efectuarse una comparación con un termómetro de referencia certificado, por lo menos una vez al año.

4.2.2.5 **Mantenimiento**

Entre las lecturas, el instrumento debería mantenerse en un recinto sin calefacción y protegido contra las precipitaciones y la radiación solar intensa. Cuando el instrumento no se utilice, sería preciso colocarlo en un estuche robusto, como el que suministra el fabricante, y mantenerlo en el interior de un local.

4.2.3 **Psicrómetro de garita**

4.2.3.1 **Descripción**

El psicrómetro de garita se compone de dos termómetros de mercurio montados verticalmente en una garita meteorológica. El diámetro de los bulbos debería ser de unos 10 mm. El bulbo de uno de los termómetros está cubierto con un manguito bien ajustado que debe sobresalir unos 20 mm del tubo del termómetro. Si el psicrómetro está equipado con una mecha y un depósito de agua para mantener húmedo el manguito del termómetro húmedo, el depósito habría de localizarse preferiblemente al lado del termómetro y con la boca al mismo nivel o ligeramente por debajo de la parte superior del bulbo del termómetro. La mecha debería mantenerse lo más recta posible y tendría que ser lo suficientemente larga para que el agua llegue hasta el bulbo del termómetro húmedo aproximadamente a la misma temperatura del bulbo y en cantidad suficiente pero no excesiva. Si no se utiliza mecha, sería preciso proteger el termómetro húmedo de la suciedad guardándolo en un pequeño tubo de vidrio entre las lecturas.

Se recomienda aspirar artificialmente el aire del psicrómetro de garita. La velocidad del aire aspirado en ambos termómetros será de unos 3 m s^{-1} . Con ese fin, se utilizan sobre todo aspiradores eléctricos o aspiradores con mecanismo de cuerda. El aire tendría que circular en sentido horizontal a nivel de los bulbos de los termómetros, y no vertical, y se debería evacuar de manera que evite su recirculación.

El rendimiento obtenido con el psicrómetro de garita puede ser muy inferior al que se indica en el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E) de la presente Guía, especialmente en caso de vientos ligeros cuando la garita no está ventilada artificialmente.

Las fórmulas psicrométricas que figuran en la sección 4.2.1.1 se aplican a los psicrómetros de garita, pero con mucha incertidumbre en los coeficientes. En Bindon (1965) se ofrece un resumen de las fórmulas utilizadas. Si la ventilación forzada es de unos 3 m s^{-1} o más a nivel del bulbo del termómetro húmedo, se pueden aplicar los valores que figuran en el anexo 4.B, con un coeficiente psicrométrico para el agua de $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Se utilizan, no obstante, valores de $6,50$ a $6,78 \cdot 10^{-4}$ para una temperatura del termómetro húmedo superior a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, y de $5,70$ a

$6,53 \cdot 10^{-4}$ para una temperatura del termómetro húmedo inferior a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para los psicrómetros de garita con ventilación natural, los coeficientes empleados varían de $7,7$ a $8,0 \cdot 10^{-4}$ para una temperatura superior a la de congelación, y de $6,8$ a $7,2 \cdot 10^{-4}$ para una temperatura inferior a la de congelación cuando el aire circula en la garita, lo cual ocurre probablemente casi siempre. Sin embargo, se recomienda el uso de coeficientes de hasta $12 \cdot 10^{-4}$ para el agua y de $10,6 \cdot 10^{-4}$ para el hielo cuando el aire no circula en la garita.

El coeficiente psicrométrico adecuado para la configuración particular de la garita, la forma del bulbo del termómetro húmedo y el grado de la ventilación, se pueden determinar mediante la comparación con un patrón de trabajo o de referencia, pero se obtendrán así datos muy dispersos y será necesario llevar a cabo una gran cantidad de muestreos para obtener un resultado fiable. Incluso cuando el coeficiente se haya obtenido mediante esa serie de muestreos, seguirá habiendo un gran margen de confianza para cualquier observación; por lo tanto, no tiene justificación apartarse de las prácticas nacionales establecidas.

4.2.3.2 **Método especial de observación**

El método descrito en la sección 4.2.1.5 se aplica a los psicrómetros de garita. En el caso de un termómetro húmedo con ventilación natural, siempre que el agua del depósito tenga aproximadamente la misma temperatura que el aire, la lectura correcta del termómetro húmedo se obtendrá unos 15 minutos después de ajustar un nuevo manguito; si la temperatura del agua es muy diferente de la del aire, podría ser necesario esperar unos 30 minutos.

4.2.3.3 **Exposición y emplazamiento**

La exposición y el emplazamiento de la garita se describen en el capítulo 2 de la parte I.

4.2.4 **Psicrómetros de honda o en noria**

4.2.4.1 **Descripción**

Un pequeño psicrómetro portátil de tipo honda o noria está compuesto de dos termómetros de mercurio sujetos a una montura robusta provista de un mango que, situado en el extremo opuesto a los bulbos de los termómetros, permite girar rápidamente la montura y los termómetros sobre un eje horizontal.

La configuración del termómetro húmedo varía según el tipo de instrumento. En algunos casos, el bulbo del termómetro húmedo se protege de los rayos solares con una pantalla; conviene utilizar este modelo para las mediciones meteorológicas.

Se podrían aplicar a estos psicrómetros las fórmulas psicrométricas que figuran en el anexo 4.B.

4.2.4.2 **Método de observación**

Deberían aplicarse las siguientes directrices:

- a) Todas las instrucciones relativas al manejo de los aspiropsicrómetros de Assmann se aplican también a los psicrómetros de honda.
- b) Los psicrómetros de honda carentes de pantalla para proteger los bulbos de los termómetros húmedos deberían protegerse de la insolación de otra manera.
- c) Conviene leer simultáneamente los termómetros en cuanto cese la ventilación porque la temperatura del termómetro húmedo comienza a subir inmediatamente y es probable que los termómetros sufran los efectos de los rayos solares.

4.2.5 **Psicrómetro calentado**

El psicrómetro calentado funciona según el principio siguiente: el volumen de vapor de agua contenido en una masa de aire no se altera si esta se calienta. Gracias a esta propiedad, no es necesario mantener un termómetro engelado cuando las condiciones son de congelación.

4.2.5.1 **Descripción**

El aire se aspira hacia un conducto que pasa sobre un calefactor eléctrico, y luego por una cámara de medición que contiene los termómetros húmedo y seco y un depósito de agua. El circuito de control del calefactor está programado para que la temperatura del aire no sea inferior a un nivel dado, que normalmente podría ser 10 °C. La temperatura del depósito de agua se mantiene de manera similar. Así, no se hiela ni el agua del depósito ni la que humedece la mecha, siempre que la diferencia psicrométrica sea inferior a 10 K y que se asegure el funcionamiento constante del psicrómetro, incluso si la temperatura del aire desciende por debajo de 0 °C. Si la temperatura es superior a 10 °C, el calefactor puede apagarse automáticamente, y el instrumento funcionará como un psicrómetro ordinario.

Los termómetros eléctricos pueden meterse completamente en una cámara de medición, y no es necesario realizar la lectura directa.

Un segundo termómetro seco se coloca a la entrada del conducto para medir la temperatura del aire ambiente, lo que permite determinar la humedad relativa ambiente.

Los bulbos de los termómetros del psicrómetro se ventilan en dirección del eje longitudinal, a una velocidad aproximada del aire de 3 m s⁻¹.

4.2.5.2 **Método de observación**

El psicrómetro calentado puede emplearse en estaciones meteorológicas automáticas.

4.2.5.3 **Exposición y emplazamiento**

El instrumento propiamente dicho debería fijarse en el exterior de la garita meteorológica. El orificio de aspiración, donde se mide la temperatura del aire ambiente, debería encontrarse en el interior de la garita.

4.2.6 **Psicrómetro de referencia de la OMM**

En OMM (1992) se describen el psicrómetro de referencia y los procedimientos de su utilización. Los termómetros seco y húmedo se colocan en una estructura de protección ventilada, de manera que el conjunto pueda utilizarse como un instrumento autónomo. Las principales características del psicrómetro de referencia son que se puede calcular el coeficiente psicrométrico a partir de la teoría de los intercambios de calor y de masa que se producen en el bulbo del termómetro húmedo, y que este coeficiente difiere del coeficiente de los otros psicrómetros, ya que tiene un valor de $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ para una humedad relativa del 50%, a 20 °C y 1 000 hPa. La temperatura del termómetro húmedo de este instrumento se acerca mucho al valor teórico (véanse los párrafos 18 y 19 del anexo 4.A). Esto se logra asegurando una evaporación particularmente eficaz en el bulbo del termómetro húmedo y una reducción al mínimo de calor externo. El cuidadoso diseño del conducto y del bulbo del termómetro húmedo, así como el control de la ventilación, determinan el tipo de flujo de aire sobre el bulbo del termómetro húmedo. El lado externo de la doble pantalla de protección es muy reflectivo, mientras que su lado interno es oscuro; los termómetros están revestidos de un material aislante y separados por una pantalla. Las pantallas y el elemento que contiene el termómetro húmedo son de acero inoxidable a fin de reducir al mínimo la transmisión del calor.

Con el método de utilización del psicrómetro de referencia se excluye totalmente la grasa en el bulbo del termómetro húmedo, incluso en las capas monomoleculares que se producen siempre al manipular cualquier parte del instrumento con los dedos. Esta es probablemente la principal razón de la estrecha relación entre el coeficiente psicrométrico de este instrumento y el valor teórico, y de su diferencia respecto de los coeficientes psicrométricos de otros instrumentos.

Con el psicrómetro de referencia se puede alcanzar una gran exactitud, un 0,38% de incertidumbre para una humedad relativa del 50% a 20 °C. La OMM también ha adoptado este instrumento como termómetro de referencia. Está diseñado para su utilización sobre el terreno, pero no es apropiado para uso habitual. Solo debería ser utilizado por personal cualificado para realizar trabajos de laboratorio muy precisos. La sección 4.9.7 trata de su uso como instrumento de referencia.

4.3 HIGRÓMETRO DE CABELLO

4.3.1 Consideraciones generales

Todo material absorbente tiende a mantener un equilibrio térmico e higrométrico con el medio ambiente. La presión del vapor de agua en la superficie de ese material se determina por la temperatura y la cantidad de agua absorbida por él. La transferencia de moléculas de agua tiende a eliminar cualquier diferencia entre esa presión y la presión del vapor de agua del aire circundante.

Se ha observado que el tamaño del cabello varía principalmente en función de la humedad relativa del aire con respecto al agua en fase líquida (para temperaturas del aire inferiores o superiores a 0 °C); y aumenta aproximadamente entre un 2% y un 2,5% para una variación de la humedad entre el 0% y el 100%. Para incrementar la relación de la superficie de un haz de cabellos con respecto a su volumen, y disminuir el coeficiente de retardo, lo que está particularmente relacionado con la utilización del instrumento a baja temperatura, se deben alisar los cabellos para obtener una sección transversal de forma elíptica y limpiar con alcohol las sustancias grasientas. Este procedimiento también ofrece una función de respuesta más lineal, pero disminuye la resistencia a la tracción. A fin de obtener mediciones exactas, es preferible disponer de un aparato equipado con un solo cabello; sin embargo, normalmente se utilizan instrumentos que tienen un haz de cabellos porque son más resistentes. Si los cabellos se tratan con sulfuro de bario (BaS) o sulfuro de sodio (Na₂S) se obtiene una mayor linealidad de la respuesta del instrumento.

Se considera que el higrógrafo o higrómetro de cabello es un instrumento apto para utilizarlo en situaciones o durante períodos en los que rara vez, o nunca, se producen niveles de humedad muy altos o muy bajos. El mecanismo del instrumento debería ser lo más sencillo posible, incluso si para ello se necesita una escala no lineal. Esto reviste particular importancia en las regiones industriales porque los contaminantes atmosféricos pueden afectar a la superficie de las partes móviles del mecanismo y aumentar la fricción entre ellas.

La velocidad de respuesta del higrómetro de cabello depende mucho de la temperatura del aire. A una temperatura de -10 °C, el retardo del instrumento es aproximadamente 3 veces mayor que el retardo a 10 °C. Para temperaturas del aire comprendidas entre 0 °C y 30 °C, y humedades relativas de entre el 20% y el 80%, un buen higrógrafo debería indicar el 90% de un cambio brusco de la humedad en aproximadamente 3 minutos.

Un buen higrógrafo, en perfectas condiciones, tendría que poder registrar la humedad relativa con una exactitud de $\pm 3\%$ a temperaturas moderadas, y con una exactitud inferior en temperaturas bajas.

Para que las mediciones realizadas a temperaturas bajas den resultados útiles, es necesario emplear un instrumento con los cabellos alisados (véase la descripción anterior).

4.3.2 Descripción

Los detalles del mecanismo de los higrómetros de cabello varían según los fabricantes. Algunos instrumentos incluyen un transductor que proporciona una señal eléctrica y pueden también disponer de una función de linealización de manera que la respuesta global del instrumento sea lineal con respecto a las variaciones de la humedad relativa.

El higrómetro de cabello más utilizado es el higrógrafo, que utiliza un haz de cabellos mantenido en ligera tensión por un pequeño resorte y conectado a un estilete de manera que amplifique sus variaciones de longitud. Al final del estilete se fija una plumilla que se mantiene en contacto con la banda de papel ajustada sobre un cilindro metálico y que registra los desplazamientos angulares del estilete. El cilindro gira sobre su eje a una velocidad constante determinada por un movimiento mecánico de relojería. La velocidad de rotación es en general igual a una revolución por día o por semana. La banda posee una escala de tiempo en abscisa que se extiende sobre la circunferencia del cilindro, y una escala de humedad en ordenada, paralela al eje del cilindro, que normalmente está en posición vertical.

El mecanismo que conecta el estilete al haz de cabellos puede incluir levas especialmente diseñadas para convertir la extensión no lineal de los cabellos, producida por las variaciones de la humedad, en un desplazamiento angular lineal del estilete.

Algunos higrómetros utilizan fibras sintéticas. Los cabellos humanos que se utilizan en los higrómetros se tratan previamente como se describe en la sección 4.3.1 para mejorar la linealidad de la respuesta y disminuir el retardo de la misma; este tratamiento implica, sin embargo, una reducción de la resistencia a la tracción.

El estilete y el mecanismo de relojería se encuentran normalmente en una cajita de cristal que permite realizar la lectura de la humedad registrada sin necesidad de mover el instrumento; el haz de cabellos sobresale de la cajita a través de una abertura hecha con tal fin. Los lados de la cajita están separados de la base compacta, pero el extremo opuesto del cabello está fijado a la cajita mediante una bisagra. Esta configuración permite acceder al cilindro y al elemento sensible que, además, puede protegerse con una caja de malla abierta.

4.3.3 Método de observación

El higrómetro de cabello siempre debería golpearse ligeramente con un dedo antes de la lectura para liberar el mecanismo de toda tensión residual. Debería procurarse, en la medida de lo posible, no tocar el higrógrafo entre los cambios de bandas salvo para realizar las marcas cronológicas.

El higrómetro y el higrógrafo permiten leer normalmente la humedad relativa redondeada al punto porcentual más próximo. Cabe señalar que el higrómetro de cabello mide la humedad relativa con respecto a la saturación sobre el agua en fase líquida, incluso a temperaturas por debajo de 0 °C.

La humedad del aire puede cambiar muy rápidamente y, por lo tanto, es de suma importancia efectuar con mucha exactitud las marcas cronológicas. Para ello, el estilete se debería mover solo en dirección de la humedad relativa decreciente sobre el diagrama. Al realizar ese desplazamiento, se aflojan los cabellos y con el resorte de tensión se aplica la fuerza que restablece la plumilla a su posición normal. No obstante, puede observarse un efecto de histéresis si la plumilla no regresa a su posición inicial.

4.3.4 Exposición y emplazamiento

El higrógrafo o higrómetro debería colocarse en una garita meteorológica. Como el amoníaco destruye el cabello, no se deben instalar en proximidades de establos o de plantas industriales que utilicen amoníaco.

Cuando se emplea en las regiones polares, sería preciso colocar el higrógrafo en una garita meteorológica especial que lo proteja suficientemente contra las precipitaciones y las ventiscas de nieve. Como medida preventiva, se puede, por ejemplo, recubrir la garita meteorológica con una red de mallas finas (Mullergas) para evitar la acumulación de cristales de nieve sobre los cabellos y sobre la superficie de contacto del mecanismo articulado. Este método solo debe utilizarse si no existe ningún riesgo de que los cristales de nieve mojen la red al fundirse.

4.3.5 **Fuentes de error**

4.3.5.1 **Variaciones del cero**

Por razones diversas, poco conocidas, el higrógrafo está sujeto a una variación del cero de su escala. Quizás la causa más probable sea una tensión excesiva de los cabellos. Por ejemplo, los cabellos pueden extenderse si las marcas cronológicas se hacen en dirección de la humedad relativa creciente en el diagrama, o bien porque el mecanismo del higrógrafo se atasca cuando decrece la humedad relativa. El cero puede variar también si el higrógrafo se mantiene mucho tiempo expuesto en aire muy seco, lo cual puede remediarse poniendo el instrumento durante un tiempo suficiente en aire saturado.

4.3.5.2 **Errores debidos a la contaminación del cabello**

La mayoría de los distintos tipos de polvo pueden ocasionar errores apreciables en las observaciones (algunas veces hasta del 15% de la humedad relativa). En la mayor parte de los casos, se pueden eliminar o reducir los errores limpiando y lavando los cabellos. Sin embargo, las sustancias nocivas encontradas en el polvo pueden destruir el cabello (véase la sección 4.3.4).

4.3.5.3 **Histéresis**

Tanto la respuesta del elemento sensible de cabellos como el mecanismo de registro del higrómetro presentan histéresis. En cuanto al mecanismo de registro, el empleo de un haz de cabellos permite reducir la histéresis, puesto que se puede aplicar una tensión relativamente más alta para eliminar el efecto de fricción. No hay que olvidar que, al igual que el desplazamiento de la palanca que acciona el estilete, la fuerza de fricción entre la plumilla y la banda registradora se amplifica, y que, a fin de superar esta fuerza, la tensión aplicada a los cabellos debe ser proporcionalmente mayor. Para reducir la histéresis, el resorte de tensión debe estar bien ajustado y todas las piezas del mecanismo articulado han de funcionar de manera correcta. El punto de apoyo principal y cualquier mecanismo de linealización en el mecanismo articulado representan una proporción considerable de la fricción total.

La histéresis en el elemento sensible de cabello es, en general, un efecto de corta duración derivado de los procesos de absorción y de desorción, y no es una causa importante de error una vez que se logra el equilibrio de presión del vapor. Véase la sección 4.3.5.1 relativa a la exposición prolongada a baja humedad.

4.3.6 **Calibración y comparación**

Las lecturas de un higrógrafo deberían verificarse lo más frecuentemente posible. Cuando los termómetros húmedo y seco se encuentran en la misma garita meteorológica que el higrógrafo es posible comparar los dos instrumentos, siempre que las condiciones sean estables para permitir la operación. De otro modo, las comparaciones sobre el terreno tienen un valor limitado debido a la diferencia en el tiempo de respuesta de los instrumentos comparados.

La calibración exacta solo puede realizarse en una cámara climatizada y por comparación con instrumentos de referencia.

Es posible verificar el punto correspondiente al 100% de humedad envolviendo el instrumento con un tejido saturado de agua, preferentemente en el interior de un recinto a una temperatura del aire constante (sin embargo, no se podrá obtener la lectura correcta si sobre los cabellos se forma una cantidad importante de gotitas de agua).

La humedad ambiente en el interior de un local puede proporcionar un valor de humedad relativa bajo para efectuar una comparación con un psicrómetro de referencia aspirado. Procede realizar una serie de lecturas.

Es posible evaluar la estabilidad y el sesgo a largo plazo estableciendo una función de correlación a partir de comparaciones efectuadas con un psicrómetro de referencia aspirado.

4.3.7 **Mantenimiento**

Debería instarse a los observadores a mantener limpio el higrómetro.

Los cabellos se deben lavar frecuentemente con un cepillo suave mojado en agua destilada para eliminar el polvo o los contaminantes solubles que se hayan acumulado. Se evitará tocar los cabellos con los dedos. Conviene mantener limpios los cojinetes del mecanismo y aplicar de vez en cuando un poco de aceite fino. Las superficies de los cojinetes de todo mecanismo de linealización contribuyen en gran parte a la fricción total del mecanismo articulado, y esta puede reducirse puliendo con grafito dichas superficies. Este procedimiento puede llevarse a cabo utilizando un papel secante frotado con la mina de un lápiz de grafito.

Si el mantenimiento se hace debidamente, los cabellos pueden durar varios años en un clima templado, siempre que no estén sometidos a una contaminación atmosférica importante. Al reemplazar los cabellos, se debe proceder al ajuste y recalibración del instrumento.

4.4 **HIGRÓMETRO DE PUNTO DE ROCÍO CON ESPEJO ENFRIADO**

4.4.1 **Consideraciones generales**

4.4.1.1 **Teoría**

El higrómetro de punto de rocío (o de punto de escarcha) se utiliza para medir la temperatura a la cual el aire húmedo, al ser enfriado, alcanza la saturación y da lugar a la formación de un depósito de rocío (o de hielo) en una superficie sólida, que generalmente es un espejo. El depósito suele detectarse a simple vista. El principio de medición se describe en la sección 4.1.4.5 y más adelante.

La temperatura termodinámica del punto de rocío se define en relación con una superficie plana de agua pura. En la práctica, las gotitas de agua tienen una superficie curvada sobre la cual la presión del vapor saturado es más alta que para una superficie plana (lo que se conoce como efecto Kelvin). Las impurezas hidrófobas tienden a intensificar ese efecto, en tanto que las impurezas hidrosolubles ejercen el efecto contrario, y tienden a reducir la tensión saturante del vapor (efecto Raoult). Los efectos Kelvin y Raoult (que suben y bajan, respectivamente, el punto de rocío aparente) se minimizan si el tamaño crítico de la gotita es más bien grande que pequeño; esto disminuye directamente el efecto de la curvatura y atenúa el efecto Raoult al reducir la concentración de las impurezas solubles.

4.4.1.2 **Principios**

Si se enfría el aire húmedo a una temperatura T , presión p y razón de mezcla r_w (o r_i), este alcanza su punto de saturación con respecto a la superficie de agua libre (o a la superficie del hielo libre a temperaturas más frías), y se puede detectar un depósito de rocío (o de escarcha) sobre una superficie sólida no higroscópica. La temperatura de este punto de saturación se denomina

temperatura termodinámica del punto de rocío T_d (o temperatura termodinámica del punto de escarcha T_f). La correspondiente presión de saturación del vapor con respecto al agua, e'_w (o al hielo e'_i), es una función de T_d (o de T_f), como muestran las siguientes ecuaciones:

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.3)$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.4)$$

El higrómetro mide la T_d o la T_f . A pesar de las grandes variaciones dinámicas de humedad en la troposfera, este instrumento puede detectar tanto las concentraciones muy altas como muy bajas del vapor de agua sirviéndose tan solo de un sensor térmico.

Para enfriar el espejo se han estado utilizando líquidos con un bajo punto de ebullición, pero este método ha sido ampliamente sustituido, salvo para muy pequeñas concentraciones de vapor de agua.

Por todo lo anterior, se hace necesario determinar si el depósito que se ha formado sobre el espejo, cuando la temperatura de la superficie es igual o inferior al punto de escarcha, es de agua subfundida o de hielo.

El higrómetro de espejo enfriado se utiliza para mediciones meteorológicas y como instrumento de referencia, tanto sobre el terreno como en laboratorio.

4.4.2 Descripción

4.4.2.1 Equipo sensor

Los sistemas más utilizados tienen una pequeña superficie reflectora de metal pulido, enfriada por un dispositivo eléctrico con efecto Peltier. El sensor consiste en un delgado espejo metálico de pequeño diámetro (2 a 5 mm), térmicamente regulado mediante un dispositivo de enfriamiento (y a veces un calefactor), y un sensor de temperatura (termopar o termómetro de resistencia de platino) fijados al reverso del espejo. El espejo debería tener una elevada conductividad térmica, una gran reflexión óptica y una gran resistencia a la corrosión, así como una baja permeabilidad al vapor de agua. Entre los materiales apropiados que se utilizan en su fabricación están el oro, la plata rodiada, el cobre cromado y el acero inoxidable.

El espejo debería estar equipado de un dispositivo (preferiblemente automático) para detectar los contaminantes que pueden aumentar o reducir el punto de rocío aparente (véase la sección 4.4.2.2), a fin de poder eliminarlos.

4.4.2.2 Equipo de detección óptica

En general, se utiliza un sistema electroóptico para detectar la formación de condensación y proporcionar al sistema de servocontrol la información que le permite regular la temperatura del espejo. Se dirige hacia el espejo un estrecho haz de luz con un ángulo de incidencia de unos 55° . La fuente de luz puede ser incandescente, pero con frecuencia se trata de un diodo fotoemisor. En los sistemas sencillos, la intensidad de la luz directamente reflejada se detecta mediante un fotodetector que regula el enfriamiento y el calentamiento a través de un mecanismo de servocontrol. La reflectancia especular de la superficie se reduce a medida que aumenta el espesor del depósito, y como no debe haber enfriamiento cuando el depósito es de poco espesor, la reducción de reflectancia varía entre el 5% y el 40%. En sistemas más complejos se utiliza un fotodetector auxiliar que detecta la luz difundida por el depósito; los dos detectores proporcionan un control muy preciso. Puede utilizarse también un segundo espejo, no enfriado, para mejorar el sistema de control.

La mayor exactitud se obtiene al controlar la temperatura del espejo para que no haya ni acumulación ni disipación de la condensación. Sin embargo, en la práctica, el sistema de servocontrol oscilará entre los valores próximos a esa temperatura. El tiempo de respuesta del

espejo al calentamiento y al enfriamiento resulta esencial para la amplitud del fenómeno de oscilación, y debería ser de entre 1 y 2 segundos. El flujo de aire también es importante para mantener un depósito estable sobre el espejo. Es posible determinar la temperatura a la cual se produce la condensación con una incertidumbre de 0,05 K.

Se puede observar la formación de gotitas de agua con ayuda de un microscopio y regular manualmente la temperatura del espejo, pero ello requiere mucho tiempo y gran habilidad.

4.4.2.3 **Equipo de control térmico**

Un dispositivo de unión térmica de efecto Peltier no es más que una sencilla bomba de calor reversible; la polaridad de la corriente continua determina si la unión térmica absorbe el calor para enfriar el espejo o si lo libera para calentarlo. Es necesario que haya un buen contacto térmico entre el dispositivo y el reverso del espejo. Para medir temperaturas muy bajas del punto de rocío, podría requerirse un instrumento equipado con un dispositivo de efecto Peltier multigradual.

Para el control térmico se utiliza un sistema eléctrico de servocontrol que recibe la señal del subsistema del detector óptico. Los sistemas modernos se controlan con un microprocesador.

Para enfriar el espejo, se puede utilizar un fluido de bajo punto de ebullición, como el nitrógeno líquido, pero esta técnica ya no se emplea tanto. Asimismo, es posible utilizar un alambre de resistencia eléctrica para calentar el espejo, pero este sistema actualmente tampoco se utiliza, debido a la aparición de los pequeños dispositivos de efecto Peltier.

4.4.2.4 **Sistema de visualización de la temperatura**

La temperatura del punto de rocío de la muestra de aire que el instrumento ofrece al observador no es otra que la temperatura del espejo, tal como la mide el termómetro eléctrico situado bajo su superficie. Los instrumentos disponibles en el mercado constan, en general, de una interfaz eléctrica para el termómetro del espejo y de un visualizador digital, aunque también pueden tener salidas eléctricas digitales o analógicas que se utilizan con sistemas de registro de datos. Un registrador de banda es muy útil para controlar el rendimiento del instrumento cuando la salida analógica proporciona un registro continuo de la señal del termómetro del espejo, pero el visualizador digital no.

4.4.2.5 **Sistemas auxiliares**

Se podría incorporar un microscopio que permitiera determinar visualmente si, cuando la temperatura del espejo es inferior a 0 °C, este está cubierto de gotitas de agua subfundida o de cristales de hielo. Algunos instrumentos tienen un detector montado sobre la superficie del espejo para determinar automáticamente esta diferencia (por ejemplo, un sensor capacitivo), y otros aplican un método basado en el factor de reflectancia.

Un sistema basado en un microprocesador puede incluir algoritmos para calcular y visualizar la humedad relativa. En ese caso, es importante que el instrumento pueda diferenciar correctamente un depósito de agua subfundida de un depósito de hielo.

Muchos instrumentos disponen de un sistema automático para reducir al mínimo los efectos de la contaminación. Puede consistir en un ciclo regular de calefacción que produce la evaporación de las impurezas volátiles y su eliminación con la circulación del aire. Se utilizan también sistemas con escobillas para la limpieza automática del espejo.

Para las mediciones meteorológicas, así como para la mayoría de las aplicaciones experimentales, el instrumento debe estar equipado con una pequeña bomba que aspire la muestra de aire a través de una cámara de medición. El instrumento debe estar provisto asimismo de un dispositivo capaz de controlar el flujo de aire para que sea compatible con el funcionamiento

estable del sistema de servocontrol de la temperatura del espejo, y para que el tiempo de respuesta a las variaciones de la humedad sea satisfactorio. El flujo de aire óptimo depende de la humedad de la muestra de aire, y normalmente varía entre 0,25 y 1 l min⁻¹.

4.4.3 **Método de observación**

El buen funcionamiento del higrómetro de punto de rocío depende de que haya un flujo de aire adecuado en la cámara de medición. Con este fin, tal vez sea necesario ajustar la graduación de un regulador (que, en general, se trata de un dispositivo de estrangulamiento situado en la parte posterior de la cámara de medición) en función de las variaciones diurnas de la temperatura del aire. La graduación del flujo de aire perturbará el funcionamiento del higrómetro, e incluso, podría ser conveniente iniciar un ciclo de calefacción. Ambas operaciones deberían efectuarse con la antelación suficiente para que el instrumento se estabilice antes de realizar la lectura. El tiempo requerido dependerá del ciclo de control del instrumento utilizado. Deberían consultarse las instrucciones del fabricante para conocer la graduación del flujo de aire y los detalles pertinentes del ciclo de control del instrumento.

Sería preciso controlar con frecuencia el estado del espejo y limpiarlo cuando haga falta pues el funcionamiento normal del instrumento no implica necesariamente que el espejo esté limpio. Así pues, este último debería lavarse con agua destilada y secarlo, con mucho cuidado, con un paño suave o con un bastoncillo de algodón para eliminar todas las impurezas solubles. Se deben tomar todas las precauciones necesarias para no rayar la superficie del espejo, sobre todo si este tiene una fina capa protectora que recubre la superficie, o está dotado de un detector de agua o de hielo. Si no se utiliza un filtro de aire, la limpieza habría de efectuarse, al menos, diariamente; en cambio, si se usa un filtro de aire, debería verificarse el estado del mismo cada vez que se realiza una observación. Sería recomendable que el observador no se sitúe demasiado cerca del orificio de aspiración, y que vele para que nada obstruya el orificio que permite la evacuación del aire.

Si, al realizarse la lectura, la temperatura es igual o inferior a 0 °C, el observador tendría que determinar si el espejo está cubierto de agua subfundida o de hielo. Si el instrumento no lo indica automáticamente, habrá de observar el espejo. Se debería comprobar periódicamente el buen funcionamiento de cualquier sistema automático.

Los mejores instrumentos ofrecen una incertidumbre de $\pm 0,3$ K en un amplio intervalo de medición del punto de rocío (-60 °C a 50 °C).

4.4.4 **Exposición y emplazamiento**

Los criterios de emplazamiento del sensor son iguales a los que se aplican a cualquier higrómetro aspirado. Sin embargo, son menos estrictos que en el caso de un psicrómetro o de un sensor de humedad relativa, debido a que las variaciones de la temperatura del aire ambiente no afectan al punto de rocío o de escarcha de una muestra de aire, siempre que esa temperatura se mantenga estable por encima del punto de rocío. Por lo tanto, no es necesario colocar el sensor en una garita meteorológica sino que debería exponerse en un espacio abierto; por ejemplo, montado sobre un poste y cubierto con una envoltura protectora, con un conducto de aspiración al nivel requerido.

También hay que disponer de un sistema de muestreo del aire. Se trata normalmente de una pequeña bomba que aspira el aire por el conducto de salida previsto en la cámara de medición y lo expulsa lejos del conducto de aspiración. Para que la técnica de muestreo tenga valor debería evitarse la recirculación del aire. En condiciones estables de funcionamiento, el contenido de vapor de agua del aire tendría que ser igual en la salida y en la entrada del sistema de aspiración. La recirculación se puede evitar situando el orificio de evacuación a mayor altura que el de aspiración, aunque esto podría no resultar eficaz en condiciones atmosféricas radiativas cuando existe un gradiente vertical de temperatura negativo.

En los instrumentos que funcionan siempre en el exterior, conviene instalar un filtro de aire que permita la circulación del mismo y que no se bloquee con frecuencia, pues un bloqueo podría ocasionar un descenso importante de la presión del aire a la vez que modificaría la temperatura de condensación en la cámara de medición. Se puede utilizar un filtro de metal sinterizado para capturar todas las partículas de aerosoles, salvo las más pequeñas. Un filtro de metal tiene la ventaja de que puede ser calentado fácilmente con un elemento eléctrico para mantenerlo seco en cualquier circunstancia. Es más sólido que el filtro de membrana y más apropiado para que pasen los flujos de aire relativamente elevados que necesita el método del espejo enfriado, en comparación con el método de sorción. Sin embargo, un filtro metálico puede ser menos resistente que algunas membranas filtrantes a la corrosión ocasionada por los contaminantes atmosféricos.

4.4.5 **Calibración**

El funcionamiento de un higrómetro de espejo utilizado sobre el terreno puede degradarse por diversas razones, por lo que convendría realizar periódicamente comparaciones con un instrumento de referencia, como el psicrómetro de Assmann u otro higrómetro de espejo enfriado. Si el instrumento funciona siempre sobre el terreno, tendrían que llevarse a cabo verificaciones de medición semanales. Cuando se presente la ocasión, debería verificarse su funcionamiento en el punto de rocío y en el punto de helada. Si la temperatura del espejo fuese inferior a 0 °C, habría que examinar visualmente el depósito, siempre que sea posible, para determinar si es agua subfundida o hielo.

Una verificación útil consiste en comparar la medición de la temperatura del espejo con la temperatura del aire mientras no funciona el sistema de control térmico del higrómetro. Se debería ventilar el instrumento y habría que medir la temperatura del aire en la entrada del conducto de aspiración del higrómetro. Esta verificación se hace mejor cuando las condiciones son estables y no se produce condensación. El sensor y el conducto de aire tendrían que estar protegidos de los rayos del sol en equilibrio térmico. Para realizar esa verificación se puede aumentar la velocidad del aire aspirado.

La interfaz del termómetro de espejo se puede calibrar independientemente sobre el terreno, simulando la señal del termómetro. Si se trata de un termómetro con resistencia de platino, puede utilizarse una caja estándar de simulación con resistencia de platino, o una caja de décadas de resistencias y un juego de tablas adecuadas. Se podría necesitar también una interfaz especial de simulación para el sistema de control del higrómetro.

4.5 **HIGRÓMETRO DE CONDENSACIÓN DE CLORURO DE LITIO CALENTADO (CÉLULA DE PUNTO DE ROCÍO)**

4.5.1 **Consideraciones generales**

4.5.1.1 **Principios**

Los principios físicos en los que se basa el método de solución salina calentada figuran en la sección 4.1.4.5.2. La presión del vapor en equilibrio en la superficie de una solución saturada de cloruro de litio es excepcionalmente baja. Por lo tanto, una solución de cloruro de litio es extremadamente higroscópica en condiciones normales de humedad atmosférica en la superficie. Si la presión del vapor ambiente es superior a la presión del vapor en equilibrio de la solución, habrá condensación del vapor de agua en la superficie de la solución (por ejemplo, a 0 °C, el vapor de agua se condensa sobre la superficie plana de una solución saturada de cloruro de litio cuando la humedad relativa alcanza solo el 15%).

Se puede obtener un dispositivo de autorregulación termodinámica calentando la solución directamente con una corriente eléctrica que la atraviese, procedente de un aparato de voltaje constante. Conviene utilizar una corriente alterna para impedir la polarización de la solución. A medida que disminuye la conductividad eléctrica disminuye también la corriente calefactora,

y se alcanza un punto de equilibrio, por lo que se mantiene una temperatura constante. Si la solución se enfría, se produce la condensación del vapor de agua, con lo que aumentará la conductividad y la corriente calefactora y se invertirá la tendencia al enfriamiento. Si la solución se calienta por encima del punto de equilibrio, el vapor de agua se evapora ocasionando un descenso de la conductividad y, por lo tanto, una disminución de la corriente calefactora al punto en que las pérdidas térmicas ocasionan un enfriamiento.

De lo anterior, se deduce que para la presión del vapor ambiente existe un límite inferior que puede medirse de esa manera a una temperatura dada. Por debajo de ese valor, la solución salina debería enfriarse para que el vapor de agua se condense. Esto equivaldría al método del espejo enfriado, salvo que en este último la condensación se produce a una temperatura más baja cuando se obtiene la saturación con respecto a una superficie de agua pura, es decir, al punto de rocío ambiente.

Este método presenta un cierto grado de incertidumbre debido a la existencia de cuatro hidratos diferentes de cloruro de litio. A ciertas temperaturas críticas, dos de los hidratos se mantienen en equilibrio con la fase acuosa, y la temperatura de equilibrio obtenida al calentar la solución varía de acuerdo a la transformación en hidrato que se produce posteriormente. En las aplicaciones meteorológicas la incertidumbre mayor ocurre a temperaturas ambiente del punto de rocío inferiores a $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para un punto de rocío ambiente de $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, la posible diferencia de la temperatura de equilibrio, según la cual se produce una de las dos transformaciones de solución de hidrato, da lugar a una incertidumbre de $\pm 3,5\text{ K}$ en el valor del punto de rocío obtenido.

4.5.1.2 **Descripción**

El higrómetro de célula de punto de rocío mide la temperatura a la cual la presión del vapor en equilibrio de una solución de cloruro de litio saturada es igual a la presión del vapor de agua ambiente. Las ecuaciones empíricas de transformación, basadas en los datos de tensión saturante del vapor para la solución de cloruro de litio y para el agua pura, permiten deducir la presión del vapor de agua y el punto de rocío ambientes con respecto a una superficie plana de agua pura. A un intervalo de temperaturas del punto de rocío que varía de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ corresponde otro de temperaturas de la célula de punto de rocío de entre $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $71\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.5.1.3 **Sensores con calefacción directa**

El sensor consta de un tubo, o bobina, que en su interior alberga, en posición axial, un termómetro de resistencia. La superficie externa del tubo está cubierta con un material de fibra de vidrio (en general, una banda enrollada alrededor y a lo largo del tubo) que se impregna de una solución acuosa de cloruro de litio, combinada a veces con cloruro de potasio. Sobre la cubierta de la bobina se enrolla un hilo bifilar de plata o de oro, manteniendo el mismo espacio entre cada vuelta. Se conecta una fuente de corriente alterna a los dos extremos del enrollado bifilar; la corriente proviene normalmente del suministro eléctrico ordinario (50 o 60 Hz). La conductividad eléctrica de la solución de cloruro de litio viene determinada por su grado de concentración. La corriente circula a través de la solución, entre las vueltas adyacentes del enrollado bifilar que actúan como electrodos. La corriente calienta la solución y, por lo tanto, aumenta la temperatura.

Salvo en condiciones de muy baja humedad, la presión del vapor ambiente, a la temperatura del aire ambiente, será superior a la presión del vapor en equilibrio en la superficie de la solución de cloruro de litio, y el vapor de agua se condensará en la superficie de la solución. Dado que la corriente eléctrica calienta la solución, se alcanzará finalmente una temperatura por encima de la cual la presión del vapor en equilibrio será superior a la presión del vapor ambiente; comenzará la evaporación y aumentará la concentración de la solución.

Al estar en funcionamiento, el instrumento alcanza una temperatura de equilibrio que varía en función de la presión del vapor de agua ambiente. Por encima de esa temperatura, la concentración de la solución aumentará por evaporación, y la corriente eléctrica y la calefacción disminuirán; la solución puede sufrir entonces pérdidas de calor que darán lugar a que su

temperatura descienda. Por debajo de la temperatura de equilibrio, la concentración de la solución disminuirá por condensación, la corriente eléctrica y la calefacción aumentarán, y ocasionarán un aumento de la temperatura de la solución. A la temperatura de equilibrio no se produce ni evaporación ni condensación porque la presión del vapor en equilibrio y la presión del vapor ambiente son iguales.

En la práctica, la temperatura de equilibrio medida varía en función de las características de construcción del sensor, y tiende a ser mucho más alta que la prevista a partir de datos sobre la presión del vapor en equilibrio para una solución saturada de cloruro de litio. No obstante, se obtiene una reproducibilidad suficientemente buena para poder utilizar una función de transferencia normalizada para todos los sensores construidos según las mismas especificaciones.

Una ventilación muy fuerte modifica las características de transferencia térmica del sensor y, si la ventilación tiene fluctuaciones, su funcionamiento es inestable.

Para reducir al mínimo los riesgos de un impulso de corriente excesivo al conectar el higrómetro (pues la resistencia de la solución a temperatura ambiente es relativamente baja), con frecuencia se conecta al calefactor una pequeña bombilla que actúa como atenuador de corriente. Esta se selecciona de manera que, a las corrientes normales de funcionamiento de la bobina, la resistencia del filamento sea lo suficientemente baja para que el higrómetro funcione adecuadamente, mientras que la corriente operativa de la bombilla incandescente (incluso para una bobina sin resistencia eléctrica) se mantiene lo suficientemente baja para que no dañe el elemento calefactor.

La presión del vapor en equilibrio de una solución saturada de cloruro de litio varía de acuerdo al hidrato en estado de equilibrio con la solución acuosa. En el rango de temperaturas de la solución correspondientes al intervalo de los puntos de rocío entre $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $41\text{ }^{\circ}\text{C}$, el cloruro de litio es monohidratado. Por debajo de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ se forma el dihidrato, y por encima de $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ el cloruro de litio anhidro. Cerca de los puntos de transición, el funcionamiento del higrómetro es inestable y las lecturas no son precisas. Sin embargo, si se añade una pequeña cantidad de cloruro de potasio (KCl) se puede extender el límite inferior del punto de rocío de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.5.1.4 **Sensores con calefacción indirecta**

Se puede mejorar la exactitud del sistema descrito en la sección 4.5.1.2 si la solución de cloruro de litio se calienta indirectamente. La conductividad de la solución se mide entre dos electrodos de platino y permite controlar un serpentín de calefacción.

4.5.2 **Método operativo**

Una vez tomadas las lecturas de la temperatura de equilibrio de la bobina, una función de transferencia permite obtener la temperatura del punto de rocío.

Se debería evitar cualquier alteración del sensor, pues las variaciones térmicas en la superficie de la bobina modifican la temperatura de equilibrio.

Sería preciso que el instrumento se alimentara permanentemente. Si su temperatura desciende por debajo de la de equilibrio, cualquiera que sea el tiempo que dure el enfriamiento, se producirá una condensación y el electrolito comenzará a gotear.

Se deben realizar periódicamente mediciones de control con un higrómetro de trabajo de referencia y, de ser necesario, hay que limpiar el instrumento y aplicarle de nuevo una solución de cloruro de litio.

Si el fabricante no proporciona un atenuador de corriente, se debería instalar ese dispositivo pues, de lo contrario, el sensor podría resultar dañado por una corriente demasiado alta al conectar el instrumento.

4.5.3 **Exposición y emplazamiento**

El higrómetro debería instalarse al aire libre, en una estructura adecuada que lo proteja de los efectos del viento y de la lluvia. El instrumento necesita también un sistema que permita mantener constante la velocidad del aire aspirado.

El calor que se desprende del higrómetro puede alterar el funcionamiento de otros instrumentos, lo cual habrá de tenerse en cuenta al seleccionar el sitio de instalación.

Los contaminantes atmosféricos afectan el funcionamiento del instrumento, sobre todo las sustancias que se disocian en solución y producen una concentración de iones importante.

4.5.4 **Fuentes de error**

Para medir la temperatura de equilibrio se necesita un termómetro de resistencia eléctrica; las fuentes de error son las asociadas normalmente con la termometría.

La temperatura de equilibrio obtenida está determinada por las propiedades del soluto, por lo que una presencia importante de impurezas tendrá consecuencias imprevisibles.

Las variaciones en la aspiración influyen en los intercambios térmicos y, por lo tanto, en la estabilidad del instrumento. Para que el funcionamiento sea estable, la velocidad del aire aspirado debe ser constante.

4.5.5 **Inspección sobre el terreno y calibración**

Se debería realizar, al menos una vez al mes, una inspección sobre el terreno con un instrumento patrón de trabajo. La calibración de la bobina del termómetro y de la pantalla de visualización de la temperatura habría que llevarla a cabo periódicamente, como se hace con otros termómetros y sistemas de visualización operativos.

4.5.6 **Mantenimiento**

El cloruro de litio debería renovarse con regularidad. Esta operación podría realizarse una vez al mes, pero dependerá del nivel de contaminación atmosférica. Cuando se cambie la solución, será preciso lavar la bobina con agua destilada y aplicar luego una nueva solución. La cobertura protectora se debería limpiar al mismo tiempo.

Para preparar una nueva solución se mezclan 5 partes de cloruro de litio anhidro con 100 partes de agua destilada, en peso, es decir, 1 g de cloruro de litio anhidro por cada 20 ml de agua.

El mantenimiento del sensor de temperatura debería realizarse según las recomendaciones que se aplican a los instrumentos eléctricos utilizados para medir la temperatura del aire, pero teniendo en cuenta la diferencia en el intervalo de temperaturas medidas.

4.6 **HIGRÓMETROS ELÉCTRICOS DE RESISTENCIA Y DE CAPACITANCIA**

4.6.1 **Consideraciones generales**

Las propiedades eléctricas de algunos materiales higroscópicos varían en función de la humedad relativa ambiente y solo presentan una pequeña dependencia térmica.

Los sensores eléctricos de humedad relativa se utilizan cada vez más en las aplicaciones que exigen una lectura remota, sobre todo cuando se requiere una visualización directa de

la humedad relativa. Como muchos de esos sensores proporcionan respuestas no lineales relativas a las variaciones de humedad, los fabricantes los equipan frecuentemente con sistemas especiales de procesamiento y visualización de datos.

4.6.2 **Resistencia eléctrica**

En el ámbito de la meteorología se pueden utilizar sensores de plástico tratados químicamente, con una capa superficial conductora de electricidad sobre el sustrato aislante. La resistencia de la superficie varía de acuerdo con la humedad relativa ambiente. El proceso de adsorción predomina sobre el de absorción porque la parte sensible a la humedad de dicho sensor se limita a la capa superficial. Por lo tanto, este tipo de sensor es capaz de responder rápidamente a las variaciones de la humedad ambiente.

Esta clase de sensor comprende varios tipos de instrumentos electrolíticos, en los que la disponibilidad de iones conductores en un electrolito higroscópico es función de la cantidad de vapor de agua adsorbida. El electrolito puede presentarse en varias formas, por ejemplo como una solución líquida o un gel, e incluso una resina intercambiadora de iones. Para evitar la polarización del electrolito, se mide la variación de impedancia respecto de una corriente alterna en vez de una corriente continua. Puede utilizarse un suministro de corriente de baja frecuencia, ya que es la resistencia a la corriente continua la que tiene que ser medida, lo cual posibilita el uso de conductores relativamente largos entre los sensores y su interfaz eléctrica.

4.6.3 **Capacitancia eléctrica**

Este método se basa en las variaciones de las propiedades dieléctricas de un material sólido, higroscópico, en función de la humedad relativa ambiente. En general se utilizan para ello materiales poliméricos. El agua absorbida en el polímero modifica sus propiedades dieléctricas debido al considerable momento dipolar de la molécula de agua.

La parte sensible del sensor de humedad consiste en una delgada hoja polímera dispuesta entre dos electrodos para formar un condensador. La impedancia eléctrica de este condensador proporciona una medida de la humedad relativa. El valor nominal de la capacitancia puede ser de apenas unos pocos o varios cientos de picofaradios, según sea el tamaño de los electrodos y el grosor del material dieléctrico. A su vez, este valor influye en el rango de la frecuencia de excitación utilizado para medir la impedancia del instrumento, que normalmente es de al menos varios kilohercios, y, por lo tanto, requiere que se hagan conexiones cortas entre el sensor y la interfaz eléctrica, a fin de reducir al mínimo los efectos de la capacitancia parásita. Por eso, la interfaz eléctrica está normalmente integrada en el sensor de capacitancia y es necesario tener en cuenta el efecto de la temperatura ambiente en el rendimiento de los componentes del circuito.

4.6.4 **Método de observación**

Los sensores que se basan en las variaciones de las propiedades electrónicas de materiales higroscópicos se utilizan con frecuencia en la lectura remota de la humedad relativa, y en las estaciones meteorológicas automáticas.

4.6.5 **Exposición y emplazamiento**

Los sensores deberían instalarse en una garita meteorológica siguiendo las instrucciones del fabricante relativas al montaje del sensor propiamente dicho. Es obligatorio utilizar filtros protectores. El contacto directo con el agua causa graves daños a los sensores que utilizan como elementos sensibles electrolitos higroscópicos; en consecuencia, habría que tener mucho cuidado para que el agua no llegue al elemento sensible de dichos sensores.

4.6.6 **Inspección sobre el terreno y calibración**

Las inspecciones sobre el terreno y las calibraciones en laboratorio deberían realizarse al igual que para los higrómetros de cabello. Para la mayoría de sensores de este tipo existe equipo auxiliar apropiado que permite realizar controles con soluciones salinas.

4.6.7 **Mantenimiento**

Debería alentarse a los observadores a mantener el higrómetro en perfecto estado de limpieza (véase la sección 4.1.4.10).

4.7 **HIGRÓMETROS DE ABSORCIÓN DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA**

Las moléculas de agua absorben la radiación electromagnética (REM) en un intervalo de bandas de onda y de longitudes de onda específicas; esta característica puede utilizarse para medir la concentración molecular del vapor de agua en un gas. Las regiones más utilizadas del espectro electromagnético con este fin son las del ultravioleta y el infrarrojo. Por ello, las técnicas se denominan con frecuencia higrimetría óptica o, más exactamente, higrimetría de absorción de la REM.

El método utiliza las mediciones de la atenuación de la radiación en una banda de ondas que corresponde a la banda de absorción del vapor de agua, a lo largo del trayecto entre la fuente de radiación y un receptor. Existen dos métodos principales para determinar el grado de atenuación de la radiación, a saber:

- a) Transmisión de radiación de banda estrecha, a una intensidad fija, hacia un receptor calibrado. La fuente de radiación más utilizada es el hidrógeno. El espectro de emisión del hidrógeno comprende la línea Lyman alfa a 121,6 nm, que coincide con una banda de absorción del vapor de agua en la región del ultravioleta donde los otros gases atmosféricos comunes tienen un bajo nivel de absorción. La trayectoria de medición es normalmente de unos cuantos centímetros.
- b) Transmisión de radiación en dos longitudes de onda, una de las cuales es fuertemente absorbida por el vapor de agua y la otra no es absorbida, o lo es solo levemente. Si se utiliza una sola fuente para generar la radiación en ambas longitudes de onda, se puede conocer con exactitud la relación de sus intensidades emitidas, de manera que se puede determinar la atenuación de la longitud de onda absorbida midiendo la relación de sus intensidades en el receptor. Para esta técnica, la fuente térmica más utilizada es una bombilla de tungsteno con filtros, que permite aislar dos longitudes de onda en la región del infrarrojo. La medición tiene una trayectoria normalmente superior a 1 m de longitud.

Los dos tipos de higrómetros de absorción de la REM requieren calibración frecuente y resultan más apropiados para medir las variaciones de la concentración de vapor que los niveles absolutos. La aplicación más conocida del higrómetro de absorción de la REM es el control de las variaciones de humedad de frecuencias muy elevadas, pues según el método no es necesario que el detector alcance una presión del vapor de equilibrio con la muestra. La constante de tiempo de un higrómetro óptico es de unos pocos milisegundos. En la actualidad, el uso del higrómetro óptico está limitado a las actividades de investigación.

4.8 **SEGURIDAD**

Para medir la humedad se utilizan diversos productos químicos. El personal que manipule esos productos debería conocer siempre sus propiedades. Los productos químicos deberían

conservarse en recipientes seguros, robustos y bien etiquetados, y almacenarse en un lugar adecuado. Las autoridades locales pueden prescribir las instrucciones relativas al uso de material tóxico.

Para medir la humedad se utilizan sobre todo soluciones salinas saturadas. A continuación se ofrecen algunas pautas de seguridad que deben tenerse en cuenta al emplear las sales más utilizadas:

- a) Cloruro de bario (BaCl_2): se presenta en forma de cristales incoloros, muy solubles en agua. Es estable, pero desprende emanaciones tóxicas en caso de incendio. No presenta reacción peligrosa con el agua, los ácidos, las bases, los oxidantes ni con los combustibles. Si se ingiere, produce náuseas, vómitos, dolores estomacales y diarrea. Es peligroso inhalar el polvo de esta sal. En contacto con la piel y los ojos causa irritación. Lavar con agua abundante y, en caso de ingestión, procurar atención médica.
- b) Cloruro de calcio (CaCl_2): se presenta en forma de cristales incoloros, delicuescentes. Muy soluble en agua, se disuelve con aumento del calor. Da inicio a la polimerización exotérmica del éter metilvinílico. Puede reaccionar con el cinc para liberar hidrógeno. No presenta reacción peligrosa con los ácidos, las bases, los oxidantes ni con los combustibles. Irrita la piel, los ojos y el sistema respiratorio. Si se ingiere, produce irritación gástrica, y la ingestión en grandes cantidades puede causar hipercalcemia, deshidratación y lesiones renales. Lavar con agua abundante y procurar atención médica.
- c) Cloruro de litio (LiCl): se presenta en forma de cristales incoloros; es estable si se mantiene seco y muy soluble en agua. Desprende emanaciones tóxicas en caso de incendio. Si se ingiere, puede modificar el balance iónico de la sangre y producir anorexia, diarrea, vómitos, vértigo y perturbaciones del sistema nervioso central; puede ocasionar también lesiones renales si la persona afectada tiene una dieta baja en sal (se debe beber mucha agua y procurar atención médica). No presenta reacción peligrosa con el agua, los ácidos, las bases, los oxidantes ni con los combustibles.
- d) Nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$): se presenta en forma de cristales incoloros, delicuescentes y muy solubles en agua. Puede dar inicio a la combustión de material inflamable. La reacción con material reductor puede ser violenta y se puede descomponer espontáneamente en dimetilformamido. Desprende emanaciones tóxicas en caso de incendio (combatir el incendio con agua pulverizada). La ingestión en grandes cantidades puede resultar mortal (beber mucha agua y procurar asistencia médica). En contacto con la piel y los ojos causa irritación (lavar con agua).
- e) Nitrato de potasio (KNO_3): se presenta en forma de cristales blancos o de polvo cristalino; es muy soluble en agua. Es estable, pero desprende emanaciones tóxicas en caso de incendio (combatir el incendio con agua pulverizada). Su ingestión en grandes cantidades produce vómitos, pero se elimina rápidamente por la orina (beber mucha agua). Irrita los ojos (lavar con agua). No presenta reacción peligrosa con el agua, los ácidos, las bases, los oxidantes ni con los combustibles.
- f) Cloruro de sodio (NaCl): se presenta en forma de cristales incoloros o de polvo blanco; es muy soluble en agua. Es estable y no presenta reacción peligrosa con el agua, los ácidos, las bases, los oxidantes ni con los combustibles. Su ingestión en grandes cantidades puede ocasionar diarrea, náuseas, vómitos, respiración profunda y acelerada y convulsiones (en casos graves se debe procurar atención médica).

Los consejos relativos a la utilización sin riesgos del mercurio figuran en el capítulo 3 de la parte I (sección 3.2.7).

4.9 INSTRUMENTOS DE REFERENCIA Y CALIBRACIÓN

4.9.1 Principios relativos a la calibración de los higrómetros

La precisión de la calibración de los sensores de humedad plantea problemas particulares debido, en gran parte, a la cantidad relativamente pequeña de vapor de agua que existe en una muestra de aire a temperaturas normales, pero también por la dificultad general que supone aislar y almacenar gases y, en especial, el vapor de agua. Actualmente está comenzando a surgir un orden jerárquico internacional en materia de trazabilidad de los patrones de referencia de la humedad.

El higrómetro gravimétrico permite establecer un patrón absoluto para la humedad (es decir, una materialización de la definición física de la cantidad de humedad). El psicrómetro de referencia (dentro de su limitado rango) constituye también una especie de patrón primario, ya que es posible calcular su rendimiento. La calibración de los patrones secundarios, de referencia y de trabajo se realiza en varias etapas. En el cuadro 4.3 figura un resumen de los instrumentos patrón de medición de la humedad y sus rendimientos.

Cuadro 4.3. Instrumentos patrón para la medición de la humedad

Instrumento patrón	Temperatura del punto de rocío		Humedad relativa (%)	
	Rango (°C)	Incertidumbre (K)	Rango	Incertidumbre
<i>Patrón primario</i>				
Requisito	-60 a -15	0,3	5 a 100	0,2
	-15 a 40	0,1	5 a 100	0,2
Higrómetro gravimétrico	-60 a -35	0,25		
	-35 a 35	0,03		
	35 a 60	0,25		
Generador de humedad patrón de dos temperaturas	-75 a -15	0,25		
	-15 a 30	0,1		
	30 a 80	0,2		
Generador de humedad patrón de dos presiones	-75 a 30	0,2		
<i>Patrón secundario</i>				
Requisito	-80 a -15	0,75	5 a 100	0,5
	-15 a 40	0,25		
Higrómetro de espejo enfriado	-60 a 40	0,15		
Psicrómetro de referencia			5 a 100	0,6
<i>Patrón de referencia</i>				
Requisito	-80 a -15	1,0	5 a 100	1,5
	-15 a 40	0,3		
Psicrómetro de referencia			5 a 100	0,6
Higrómetro de espejo enfriado	-60 a 40	0,3		
<i>Patrón de trabajo</i>				
Requisito	-15 a 40	0,5	5 a 100	2
Psicrómetro de Assmann	-10 a 25		40 a 90	1
Higrómetro de espejo enfriado	-10 a 30	0,5		

La inspección práctica sobre el terreno se realiza frecuentemente por medio de psicrómetros aspirados y sensores del punto de rocío o higrómetros de capacitancia bien diseñados como patrones de trabajo. Estos tipos específicos de patrones deben poder controlarse con patrones de niveles más altos mediante calibraciones muy cuidadosas. Todo instrumento que se utilice como patrón se tiene que calibrar individualmente para todas las variables que forman parte del cálculo de la humedad (temperatura del aire, temperatura del termómetro húmedo, temperatura del punto de rocío, etc.). También deberían controlarse otros factores que afectan el rendimiento de ese tipo de instrumento, por ejemplo el flujo de aire.

4.9.2 Frecuencia y métodos de calibración

Todos los sensores de humedad que se utilizan sobre el terreno requieren una calibración periódica. Para los psicrómetros y los higrómetros de punto de rocío que usan un detector de temperatura, la calibración puede realizarse cada vez que se haga el mantenimiento de rutina. Se efectuará una comparación con un patrón de trabajo, como el psicrómetro de Assmann, al menos una vez al mes.

Conviene utilizar como patrón de trabajo un psicrómetro aspirado de tipo estándar, como el de Assmann, pues tiene la ventaja de que se puede verificar en su totalidad comparando los termómetros seco y húmedo que lo constituyen y, además, porque se sabe si funciona bien cuando el ventilador produce un sonido normal. El instrumento de referencia debería calibrarse a intervalos adecuados en función del tipo de aparato.

Se pueden utilizar soluciones salinas saturadas para los sensores que solo requieren una muestra de poco volumen. Durante la calibración, la temperatura ambiente debe mantenerse estable; por lo tanto, es difícil fiarse del resultado de dichas soluciones sobre el terreno. Cuando se utilizan soluciones salinas con fines de control se debe considerar que el valor nominal de la humedad dada para la solución salina no se remite a ningún patrón primario.

4.9.3 Calibración en el laboratorio

La calibración en el laboratorio es esencial para mantener la precisión, teniendo en cuenta lo siguiente:

- a) Instrumentos patrón de trabajo y sobre el terreno: la calibración en laboratorio de instrumentos patrón de trabajo y sobre el terreno debería realizarse con la misma periodicidad que la de los termómetros en uso. Para hacerlo, el dispositivo del sensor del espejo enfriado se puede tratar separadamente de la unidad de control. El termómetro de espejo tendría que calibrarse por separado, y la unidad de control habría de calibrarse con la misma frecuencia que los demás elementos del equipo electrónico de precisión. La calibración de un instrumento de observación no requiere necesariamente ayuda de un generador de humedad si los componentes se han calibrado separadamente como se ha descrito anteriormente.

El buen funcionamiento de un instrumento se puede verificar en un recinto con condiciones estables comparándolo con un instrumento de referencia, como el psicrómetro de Assmann o un higrómetro patrón de espejo enfriado. Si el instrumento de observación tiene un detector de hielo, convendría controlar también el buen funcionamiento de ese sistema.

- b) Instrumentos de referencia y patrón: la calibración en el laboratorio de instrumentos de referencia y patrón requiere un generador de humedad de precisión y un higrómetro patrón de transferencia apropiado. Los generadores de humedad de dos presiones y de dos temperaturas permiten generar un flujo de aire adecuado, a una temperatura y un punto de rocío predeterminados. La calibración debería realizarse al menos una vez cada 12 meses y para todo el rango correspondiente a la aplicación de referencia del instrumento. La calibración del termómetro de espejo y del sistema de visualización de la temperatura debería llevarse a cabo separadamente, al menos una vez cada 12 meses.

4.9.4 Patrones primarios

4.9.4.1 Higrometría gravimétrica

El método gravimétrico permite obtener una medición absoluta del contenido de vapor de agua en una muestra de aire, en función de su razón de mezcla de humedad. Para ello se extrae el vapor de agua que contiene la muestra, utilizando un desecante cuya masa se conoce, como el pentóxido de difósforo (P_2O_5) o el perclorato de magnesio ($Mg(ClO_4)_2$). Se pesa el desecante antes y después de absorber el vapor, y la diferencia permite establecer la masa del vapor de agua. La masa de la muestra seca puede calcularse pesándola (tras la licuefacción para que sea más fácil manipular el volumen de la muestra) o midiendo su volumen (conociendo su densidad).

La complejidad del equipo necesario para llevar a cabo con exactitud el procedimiento descrito limita su aplicación al ámbito del laboratorio. Además, para obtener mediciones exactas se requiere examinar un volumen considerable de la muestra de aire; en la práctica, es necesario que el aire circule de manera constante durante varias horas, según sea la humedad del aire, a fin de que la masa de vapor de agua sea suficiente para obtener una medición exacta del peso. Por lo tanto, el método se emplea solo para obtener un patrón absoluto de referencia. Este tipo de equipo se encuentra sobre todo en los laboratorios de calibración nacional.

4.9.4.2 Generador dinámico de humedad patrón de dos presiones

Este aparato de laboratorio sirve para generar gas húmedo cuya humedad relativa se determina sobre una base absoluta. El gas portador atraviesa una cámara de saturación a la presión P_1 y pasa a una segunda cámara en la cual se produce su expansión isotérmica a una presión inferior P_2 . Ambas cámaras se mantienen a la misma temperatura en un baño de aceite. Según la ley de Dalton de las presiones parciales, la humedad relativa de la mezcla vapor de agua/gas está directamente relacionada con la presión total de cada una de las dos cámaras, es decir, la presión parcial e' del vapor en la cámara de baja presión tendrá la misma relación que la presión de saturación del vapor e'_w y la presión total en el saturador de alta presión será igual a la presión total en la cámara de baja presión. De este modo la humedad relativa U_w viene dada por la ecuación:

$$U_w = 100 \cdot e'/e'_w = 100 \cdot P_1/P_2 \quad (4.5)$$

La relación se mantiene también en la fase sólida si el gas está saturado con respecto al hielo a la presión P_1 :

$$U_i = 100 \cdot e'/e'_i = 100 \cdot P_1/P_2 \quad (4.6)$$

4.9.4.3 Generador dinámico de humedad patrón de dos temperaturas

Este aparato de laboratorio proporciona un flujo de gas húmedo a una temperatura T_1 , con una temperatura de punto de rocío o de punto de escarcha T_2 . Dos baños a temperatura controlada, ambos con intercambiadores térmicos, y uno con un saturador que contiene agua o hielo, sirven para saturar la corriente de aire a la temperatura T_1 , y luego para producir un calentamiento isobárico a la temperatura T_2 . En los aparatos diseñados para uso práctico, el aire circula continuamente para asegurar la saturación. En los instrumentos de control el aire es aspirado a la temperatura T_2 y en baja proporción con respecto a la circulación principal.

4.9.5 Patrones secundarios

Un instrumento patrón secundario debería recibir un cuidadoso mantenimiento. Solo se sacará del laboratorio para calibrarlo con un patrón primario o para compararlo con otros patrones secundarios. Estos últimos pueden servir como patrones de transferencia de los patrones primarios.

Se puede utilizar un higrómetro de espejo enfriado como instrumento patrón secundario en condiciones controladas de temperatura, humedad y presión. Con este fin, el higrómetro debería calibrarse en un laboratorio acreditado, que proporcionará los límites de incertidumbre para todo el intervalo de funcionamiento del instrumento. Esta calibración estará directamente vinculada a un patrón primario y debería efectuarse a intervalos regulares (en general, una vez cada 12 meses).

Las consideraciones generales sobre el higrómetro de espejo enfriado figuran en la sección 4.4. Este método presenta una técnica fundamental para determinar la humedad atmosférica. Si se siguen correctamente las instrucciones del fabricante sobre el mantenimiento y la utilización del instrumento, este puede dar una medición primaria del punto de rocío o del punto de escarcha dentro de los límites de incertidumbre determinados por la correspondencia entre la temperatura de la superficie del espejo y el punto adecuado del ciclo de condensación/evaporación, y la temperatura registrada por el termómetro del espejo en el momento de la observación. Se deben tener en cuenta los efectos Kelvin y Raoult sobre la temperatura de condensación y, con respecto a cualquier variación de la presión del aire causada por la técnica de muestreo, se aplicarán las ecuaciones que figuran en la sección 4.4.1.2.

4.9.6 **Patrones de trabajo (e instrumentos de referencia sobre el terreno)**

Se puede utilizar un higrómetro de espejo enfriado o un psicrómetro de Assmann como patrón de trabajo para realizar las comparaciones en condiciones ambiente sobre el terreno o en el laboratorio. Con este fin, es necesario haber realizado comparaciones a nivel de patrón de referencia. Las comparaciones deberían realizarse al menos una vez cada 12 meses, en un recinto con condiciones estables. El patrón de trabajo necesita un dispositivo de aspiración apropiado para tomar muestras de aire.

4.9.7 **Psicrómetro de referencia de la OMM**

Este tipo de instrumento es fundamentalmente un patrón primario porque se puede calcular su rendimiento. Sin embargo, se utiliza principalmente como instrumento de referencia de alta precisión, en especial para las pruebas de homologación de otros sistemas de instrumentos de observación. Se ha diseñado para que funcione como instrumento autónomo, cerca de una garita meteorológica o de otro instrumento de observación. Se utiliza siguiendo especificaciones precisas. Debería ser empleado por personal competente, con experiencia en trabajos de laboratorio de precisión; se prestará atención particular a la aspiración, y se tomarán las precauciones necesarias para evitar la contaminación del termómetro húmedo por contacto con los dedos o con cualquier otro objeto. Existen, no obstante, pruebas sencillas que permiten validar las lecturas en cualquier momento y que deberían realizarse frecuentemente durante el funcionamiento. En OMM (1992) se describe el psicrómetro y se dan recomendaciones para su uso.

4.9.8 **Soluciones salinas**

Una solución salina permite crear valores característicos de la humedad relativa en el aire por encima de esta. Los valores de humedad relativa dependen de la estructura química de la sal, su concentración y la temperatura. Hay dos tipos de solución salina:

- a) La solución salina no saturada, en forma de ampollas de solución, que crea una atmósfera con cierta humedad relativa. Esas ampollas suelen utilizarse para empapar una almohadilla en un soporte diseñado para exponer un sensor a la humedad producida.
- b) La solución salina saturada, que mantiene una concentración estable de humedad relativa cuando se realizan ambas fases de la sal: cuando la solución está saturada de sal y cuando parte de la sal permanece en fase sólida. En ese caso, la presión de vapor depende solamente de la temperatura.

Para calibrar los sensores de humedad relativa se pueden utilizar recipientes con soluciones salinas saturadas adecuadas. Las sales más utilizadas, y su humedad relativa de saturación a 25 °C, son las siguientes:

Cloruro de bario (BaCl_2): 90,3%
Cloruro de sodio (NaCl): 75,3%
Nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$): 52,9%
Cloruro de calcio (CaCl_2): 29,0%
Cloruro de litio (LiCl): 11,1%

Es importante que la solución tenga una superficie grande en comparación con la del elemento sensible y el volumen de aire incluido, para que se alcance rápidamente el equilibrio. Se requiere también un orificio de acceso hermético para el sensor de control. La temperatura del recipiente debería medirse y mantenerse a un nivel constante, ya que, para la mayoría de las sales, el grado de humedad de saturación tiene un coeficiente térmico importante.

El empleo de soluciones salinas saturadas exige algunas precauciones. El personal encargado de manipular dichas sales debería conocer su grado de toxicidad y su poder corrosivo. Todas las sales mencionadas anteriormente se pueden utilizar sin peligro, pero se debe evitar su contacto con la piel, su ingestión y la salpicadura en los ojos. Las sales deberían mantenerse siempre en recipientes seguros y con etiquetas que indiquen con toda claridad los peligros que representan. Habría que tomar precauciones al disolver los cristales de cloruro de calcio en agua, porque esta manipulación ocasiona una importante emanación de calor. Los peligros que presentan estos productos químicos se detallan en la sección 4.8.

Las soluciones salinas saturadas son un método práctico para ajustar cierto tipo de higrómetros (de capacitancia), aunque, a efectos de la calibración, debería emplearse también un instrumento de referencia.

ANEXO 4.A. DEFINICIONES Y ESPECIFICACIONES DEL VAPOR DE AGUA EN LA ATMÓSFERA

(adaptado del apéndice B del Volumen I del Reglamento Técnico (OMM-N° 49))

1) **La razón de mezcla r** del aire húmedo es la relación entre la masa m_v de vapor de agua y la masa m_a de aire seco con el que está asociado el vapor de agua:

$$r = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.A.1)$$

2) **La humedad específica, concentración de la masa o contenido de humedad q** del aire húmedo es la relación entre la masa m_v de vapor de agua y la masa $m_v + m_a$ de aire húmedo en que está contenida la masa m_v de vapor de agua:

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} \quad (4.A.2)$$

3) **Concentración de vapor (densidad de vapor de agua en una mezcla) o humedad absoluta:** en una mezcla de vapor de agua y de aire seco, la concentración de vapor ρ_v se define como la relación entre la masa de vapor m_v y el volumen V ocupado por la mezcla:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} \quad (4.A.3)$$

4) **Fracción molar del vapor de agua de una muestra de aire húmedo:** la fracción molar x_v del vapor de agua de una muestra de aire húmedo, compuesto de una masa m_a de aire seco y de una masa m_v de vapor de agua, se define como la relación entre el número de moles de vapor de agua ($n_v = m_v/M_v$) y el número total de moles de la muestra $n_v + n_a$, donde n_a indica el número de moles de aire seco ($n_a = m_a/M_a$) de la muestra en cuestión. Esto da:

$$x_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \quad (4.A.4)$$

o

$$x_v = \frac{r}{0,62198 + r} \quad (4.A.5)$$

donde r es la razón de mezcla ($r = m_v/m_a$) del vapor de agua de la muestra de aire húmedo.

5) **La tensión de vapor e'** del vapor de agua del aire húmedo a una presión total p y con una razón de mezcla r se define por:

$$e' = \frac{r}{0,62198 + r} p = x_v \cdot p \quad (4.A.6)$$

6) **Saturación:** se dice que el aire húmedo está saturado, para una presión y una temperatura dadas, si su razón de mezcla es tal que el aire húmedo puede coexistir en equilibrio indiferente con una fase condensada asociada (líquida o sólida) a la misma temperatura y a la misma presión, siendo plana la superficie de contacto entre ambas fases.

7) **Razón de mezcla saturante:** el símbolo r_w designa la razón de mezcla saturante del aire húmedo con respecto a una superficie plana de la fase líquida asociada. El símbolo r_i designa la razón de mezcla saturante del aire húmedo con respecto a una superficie plana de la fase sólida asociada. Las fases líquidas y sólidas asociadas de referencia consisten, respectivamente, en agua casi pura y en hielo casi puro, estando presentes en una y otro un poco de aire disuelto.

8) **Tensión saturante del vapor de la fase pura:** la tensión saturante e_w del vapor acuoso puro con relación al agua líquida es la presión del vapor cuando se halla en estado de equilibrio indiferente con una superficie plana de agua pura a la misma temperatura y presión; lo mismo para e_i con relación al hielo; e_w y e_i son funciones que dependen solamente de la temperatura. Es decir:

$$e_w = e_w(T) \quad (4.A.7)$$

$$e_i = e_i(T) \quad (4.A.8)$$

9) **Fracción molar del vapor de agua en aire húmedo saturado con respecto al agua:** la fracción molar del vapor de agua en aire húmedo saturado con respecto al agua, a una presión p y a una temperatura T , es la fracción molar x_{vw} del vapor de agua de una muestra de aire húmedo, a la misma presión p y a la misma temperatura T , que está en equilibrio estable en presencia de una superficie plana de agua que contiene la cantidad de aire disuelto correspondiente al equilibrio. Análogamente, x_{vi} se utilizará para indicar la fracción molar saturante con relación a una superficie plana de hielo que contiene la cantidad de aire disuelto correspondiente al equilibrio.

10) **Tensión saturante del vapor del aire húmedo:** la tensión saturante del vapor con relación al agua líquida e'_w del aire húmedo a la presión p y a la temperatura T se define por:

$$e'_w = \frac{r_w}{0,62198 + r_w} p = x_{vw} \cdot p \quad (4.A.9)$$

Análogamente, la tensión saturante del vapor con relación al hielo e'_i del aire húmedo a la presión p y a la temperatura T se define por:

$$e'_i = \frac{r_i}{0,62198 + r_i} p = x_{vi} \cdot p \quad (4.A.10)$$

11) **Relaciones entre las tensiones saturantes del vapor de la fase pura y del aire húmedo:** en los intervalos meteorológicos de presiones y temperaturas, las siguientes relaciones tienen un error del 0,5% o menos:

$$e'_w = e_w \quad (4.A.11)$$

$$e'_i = e_i \quad (4.A.12)$$

12) **La temperatura termodinámica del punto de rocío T_d** del aire húmedo a la presión p y con una razón de mezcla r es la temperatura a la cual el aire húmedo, saturado con respecto al agua a la presión dada, tiene una razón de mezcla saturante r_w igual a la razón de mezcla dada r .

13) **La temperatura termodinámica del punto de congelación T_f** del aire húmedo a la presión p y con la razón de mezcla r es la temperatura a la cual el aire húmedo, saturado con respecto al hielo a la presión dada, tiene una razón de mezcla saturante r_i igual a la razón de mezcla dada r .

14) **La temperatura del punto de rocío y del punto de congelación** así definidas están ligadas con la razón de mezcla r y la presión p por las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.A.13)$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0,62198 + r} \quad (4.A.14)$$

15)¹ **La humedad relativa U_w del aire húmedo con respecto al agua**, a la presión p y a la temperatura T , es el coeficiente, expresado en tanto por ciento, entre la fracción molar del vapor de agua x_v y la fracción molar del vapor de agua saturante x_{vw} que el aire tendría si estuviera saturado con respecto al agua a la misma presión p y a la temperatura T . En consecuencia será:

$$U_w = 100 \left(\frac{x_v}{x_{vw}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{px_v}{px_{vw}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{e'}{e'_w} \right)_{p,T} \quad (4.A.15)$$

donde los subíndices p, T indican que cada término está sometido a las mismas condiciones de presión y temperatura. La última expresión es análoga en su forma a la definición clásica fundada en la ley de Dalton de las presiones parciales.

También U_w está vinculada a la razón de mezcla r por la expresión:

$$U_w = 100 \frac{r}{r_w} \cdot \frac{0,62198 + r_w}{0,62198 + r} \quad (4.A.16)$$

donde r_w es la razón de mezcla saturante a la presión y temperatura del aire húmedo.

16)¹ **La humedad relativa U_i del aire húmedo con respecto al hielo**, a la presión p y a la temperatura T , es el coeficiente, expresado en tanto por ciento, entre la fracción molar del vapor de agua x_v y la fracción molar del vapor de agua saturante x_{vi} que el aire tendría si estuviera saturado con respecto al hielo, a la misma presión p y temperatura T , lo que da, por analogía con las definiciones que figuran en el párrafo 15:

$$U_i = 100 \left(\frac{x_v}{x_{vi}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{px_v}{px_{vi}} \right)_{p,T} = 100 \left(\frac{e'}{e'_i} \right)_{p,T} \quad (4.A.17)$$

17) **La humedad relativa para temperaturas inferiores a 0 °C** debe calcularse con respecto al agua líquida. Las ventajas de este procedimiento son las siguientes:

- la mayor parte de los higrómetros, esencialmente sensibles a la humedad relativa, indican la humedad relativa con respecto al agua a todas las temperaturas;
- la mayoría de las nubes a temperaturas inferiores a 0 °C están formadas enteramente o casi enteramente por agua líquida;
- en general no se observan humedades relativas superiores al 100%. Esto es particularmente importante en los informes sinópticos, pues la atmósfera se halla frecuentemente sobresaturada con respecto al hielo a temperaturas inferiores a 0 °C;
- la mayoría de las observaciones de humedad relativa realizadas a temperaturas inferiores a 0 °C se expresan a partir de la saturación con respecto al agua líquida.

18) **La temperatura termodinámica del aire húmedo medida con un termómetro húmedo** a la presión p , temperatura T y razón de mezcla r es la temperatura T_w lograda por el aire húmedo al ser adiabáticamente saturado a la presión p por la evaporación en el aire húmedo de agua líquida a la presión p y temperatura T_w y que contiene la cantidad de aire disuelto correspondiente al equilibrio con aire saturado de la misma presión y temperatura. T_w se define por la ecuación:

$$h(p, T, r) + [r_w(p, T_w) - r] h_w(p, T_w) = h(p, T_w, r_w(p, T_w)) \quad (4.A.18)$$

donde: $r_w(p, T_w)$ es la razón de mezcla del aire húmedo saturado a la presión p y a la temperatura T_w ; $h_w(p, T_w)$ es la entalpía² de 1 gramo de agua pura a la presión p y a la temperatura T_w ; $h(p, T, r)$ es la entalpía de $1 + r_w$ gramos de aire húmedo, compuesto de 1 gramo de aire seco y de r gramos de vapor de agua, a la presión p y a la temperatura T ; y $h(p, T_w, r_w(p, T_w))$ es la entalpía de $1 + r_w$ gramos de aire saturado, compuesto de 1 gramo de aire seco y de r_w gramos de vapor de agua, a la presión p y a la temperatura T_w . (Esta es una función de p y de T_w solamente, y puede designarse apropiadamente por $h_{sw}(p, T_w)$).

Si el aire seco y el vapor de agua son considerados como gases perfectos con calores específicos constantes, la ecuación se convierte en:

$$T - T_w = \frac{[r_w(p, T_w) - r] L_v(T_w)}{c_{pa} + r c_{pv}} \quad (4.A.19)$$

donde: $L_v(T_w)$ es el calor de vaporización del agua a la temperatura T_w ; c_{pa} es el calor específico del aire seco a presión constante; y c_{pv} es el calor específico del vapor de agua a presión constante.

Nota: La temperatura termodinámica del termómetro húmedo que acabamos de definir ha sido denominada durante algún tiempo "temperatura de saturación adiabática" por los ingenieros dedicados al acondicionamiento del aire.

¹ Las ecuaciones 4.A.15 y 4.A.17 no se aplican al aire húmedo cuando la presión p es inferior a la tensión saturante del vapor del agua y hielo puros, respectivamente, a una temperatura T .

² La entalpía de un sistema en equilibrio a una presión p y a una temperatura T se define como $E + pV$, donde E es la energía interna del sistema y V es su volumen. La suma de las entalpías de las fases de un sistema cerrado es constante en los procesos isobáricos adiabáticos.

19) **La temperatura termodinámica del aire húmedo medida con un termómetro recubierto de hielo** a la presión p , temperatura T y razón de mezcla r es la temperatura T_i a la que el hielo puro a la presión p se evaporará en aire húmedo para saturarlo adiabáticamente a la presión p y a la temperatura T_i . Se trata de saturación con respecto al hielo. T_i se define por la ecuación:

$$h(p, T, r) + [r_i(p, T_i) - r] h_i(p, T_i) = h(p, T_i, r_i(p, T_i)) \quad (4.A.20)$$

donde: $r_i(p, T_i)$ es la razón de mezcla del aire húmedo saturado a la presión p y a la temperatura T_i ; $h_i(p, T_i)$ es la entalpía de 1 gramo de hielo puro a la presión p y a la temperatura T_i ; $h(p, T, r)$ es la entalpía de $1 + r$ gramos de aire húmedo, compuesto de 1 gramo de aire seco y de r gramos de vapor de agua, a la presión p y a la temperatura T ; y $h(p, T_i, r_i(p, T_i))$ es la entalpía de $1 + r_i$ gramos de aire saturado, compuesto de 1 gramo de aire seco y de r_i gramos de vapor de agua, a la presión p y a la temperatura T_i . (Esta es una función de p y de T_i solamente, y puede designarse apropiadamente por $h_{st}(p, T_i)$).

Si el aire seco y el vapor de agua son considerados como gases ideales con calores específicos constantes, la ecuación se convierte en:

$$T - T_i = \frac{[r_i(p, T_i) - r] L_s(T_i)}{c_p + r c_{pv}} \quad (4.A.21)$$

donde $L_s(T_i)$ es el calor de sublimación del hielo a la temperatura T_i .

La relación entre T_w y T_i , así definidas, y la temperatura del termómetro húmedo o del termómetro recubierto de hielo indicada por un psicrómetro dado, debe establecerse mediante experimentos cuidadosamente controlados, teniendo en cuenta los diferentes parámetros en cuestión, por ejemplo, la ventilación, las dimensiones del depósito del termómetro y la radiación.

ANEXO 4.B. FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE LAS MEDICIONES DE LA HUMEDAD

(véase también la sección 4.1.2)

Tensión saturante del vapor:

$$e_w(t) = 6,112 \exp [17,62 t / (243,12 + t)]$$

Agua (-45 °C a 60 °C) (fase pura)

$$e'_w(p, t) = f(p) \cdot e_w(t)$$

Aire húmedo

$$e_i(t) = 6,112 \exp [22,46 t / (272,62 + t)]$$

Hielo (-65 °C a 0 °C) (fase pura)

$$e'_i(p, t) = f(p) \cdot e_i(t)$$

Aire húmedo

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6} p - 0,074 p^{-1}$$

[véase la nota]

Punto de rocío y punto de escarcha:

$$t_d = \frac{243,12 \cdot \ln [e' / 6,112 f(p)]}{17,62 - \ln [e' / 6,112 f(p)]}$$

Agua (-45 °C a 60 °C)

$$t_f = \frac{272,62 \cdot \ln [e' / 6,112 f(p)]}{22,46 - \ln [e' / 6,112 f(p)]}$$

Hielo (-65 °C a 0 °C)

Fórmulas psicrométricas para el psicrómetro de Assmann:

$$e' = e'_w(p, t_w) - 6,53 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0,000944 t_w) \cdot p \cdot (t - t_w)$$

Agua

$$e' = e'_i(p, t_i) - 5,75 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (t - t_i)$$

Hielo

Humedad relativa:

$$U = 100 e' / e'_w(p, t) \%$$

$$U = 100 e'_w(p, t_d) / e'_w(p, t) \%$$

Símbolos empleados:

t = temperatura del aire (temperatura del termómetro seco)

t_w = temperatura del termómetro húmedo

t_i = temperatura del termómetro engelado

t_d = temperatura del punto de rocío

t_f = temperatura del punto de escarcha

p = presión del aire húmedo

$e_w(t)$ = tensión saturante del vapor en la fase pura con respecto al agua a la temperatura del termómetro seco

- $e_w(t_w)$ = tensión saturante del vapor en la fase pura con respecto al agua a la temperatura del termómetro húmedo
- $e_i(t)$ = tensión saturante del vapor en la fase pura con respecto al hielo a la temperatura del termómetro seco
- $e_i(t_i)$ = tensión saturante del vapor en la fase pura con respecto al hielo a la temperatura del termómetro engelado
- $e'_w(t)$ = tensión saturante del vapor del aire húmedo con respecto al agua a la temperatura del termómetro seco
- $e'_w(t_w)$ = tensión saturante del vapor del aire húmedo con respecto al agua a la temperatura del termómetro húmedo
- $e'_i(t)$ = tensión saturante del vapor del aire húmedo con respecto al hielo a la temperatura del termómetro seco
- $e'_i(t_i)$ = tensión saturante del vapor del aire húmedo con respecto al hielo a la temperatura del termómetro engelado
- U = humedad relativa

Nota: En realidad, f es una función tanto de la presión como de la temperatura, es decir, $f = f(p, t)$, tal como se expone en la introducción del cuadro 4.10 en OMM (1966). En la práctica, la dependencia de la temperatura ($\pm 0,1\%$) es muy inferior a la de la presión (0% a +0,6%), por lo que puede omitirse en la fórmula (véase también el capítulo 10 en OMM (1989a)). Sin embargo, esta fórmula solo debería utilizarse para presiones de alrededor de 1 000 hPa (es decir, medidas en superficie) y no para medidas en altitud, en las que habría que utilizar el cuadro 4.10 en OMM (1966).

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Anderson, P. S., 1995: "Mechanism for the Behavior of Hydroactive Materials Used in Humidity Sensors", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 12, págs. 662 a 667.
- Bindon, H. H., 1965: "A critical review of tables and charts used in psychrometry", en *Humidity and Moisture* (A. Wexler, ed.). Reinhold, Nueva York, vol. 1, págs. 3 a 15.
- Ingleby, B., D. Moore, C. Sloan y R. Dunn, 2013: "Evolution and Accuracy of Surface Humidity Reports", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 30, págs. 2025 a 2043.
- Organización Meteorológica Mundial, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment) (WMO-No. 188, TP 94). Ginebra.
- , 1989a: *WMO Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison* (D. Sonntag). Instruments and Observing Methods Report No. 34 (WMO/TD-No. 289). Ginebra.
- , 1989b: *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud). Instruments and Observing Methods Report No. 38 (WMO/TD-No. 316). Ginebra.
- , 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R. G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194 (WMO-No. 759). Ginebra.
- , 2011a: *Reglamento Técnico* (OMM-Nº 49), Volumen I. Ginebra.
- , 2011b: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred). Instruments and Observing Methods Report No. 106 (WMO/TD-No. 1579). Ginebra.
- Sonntag, D., 1990: "Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90, and psychrometer formulae", en *Zeitschrift für Meteorologie*, vol. 40, núm. 5, págs. 340 a 344.
- , 1994: "Advancements in the field of hygrometry", en *Zeitschrift für Meteorologie*, vol. 3, núm. 2, págs. 51 a 66.
- Wexler, A. (ed.), 1965: *Humidity and Moisture*, vols. 1 y 3. Reinhold, Nueva York.
-