

# ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LAS EXPRESIONES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN SÓLIDOS

Enrique Martines L., Leonel Lira C.  
Centro Nacional de Metrología  
km 4.5 Carretera a los Cués, Municipio el Marqués, Querétaro  
Teléfono: 442-2 11 05 00, ext. 3420, fax: 442-2110548, email: emartine@cenam.mx

**Resumen:** Se presenta un análisis de las dos definiciones que se usan para determinar el contenido de humedad en materiales sólidos: contenido de humedad en base húmeda y contenido de humedad en base seca. Se discuten sus ventajas y desventajas, y se describen las principales áreas de aplicación donde es conveniente usar cada una de ellas.

Adicionalmente se describen algunas relaciones de equivalencia para realizar la conversión entre ambas y la relación numérica que guardan. Desde el punto de vista metrológico se presenta la ecuación para estimar la incertidumbre en la ecuación conversión.

Finalmente, se discuten los errores que se pueden cometer al no indicar la base de masa en la que se expresa un valor de contenido de humedad, y se presentan dos ecuaciones que permiten calcular los cambios de humedad y la masa de agua ganada o perdida en los procesos de humectación y secado.

## 0. INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad es una magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido y se puede representar en términos de una base de masa seca o de una base de masa húmeda. Aunque ambas expresiones representan el contenido de humedad de una muestra, sus valores numéricos son distintos, por lo que al expresar el contenido de humedad sin indicar la base de masa, se puede incurrir en un error de interpretación.

La mayoría de los instrumentos comerciales que miden el contenido de humedad en materiales sólidos, no indican la base de masa en la que expresan los valores. De igual forma los análisis de transporte de humedad en materiales de construcción, secado de granos, entre otros tampoco indican la base de masa usada; en ambos casos se usan diferentes bases de masa.

Esta magnitud es de interés en diversos campos de aplicación, entre los que se encuentran: la industria de alimentos; granos y cereales, la industria de la construcción, la industria del papel, la fabricación de instrumentos de medición, entre otras.

La metrología desarrolla y establece patrones de medición de ésta y otras magnitudes, los cuales permiten dar trazabilidad a las mediciones realizadas con diversos instrumentos.

Los aspectos de mayor interés del contenido de humedad están relacionados con: la medición, el control, el transporte (transferencia) y los efectos que tiene su presencia en los materiales. Cada uno de estos aspectos ha sido tratado ampliamente de manera formal en libros de texto o en revistas especializadas y donde se usa alguna definición de contenido de humedad.

No obstante que estas definiciones son bien conocidas, la información relacionada con ellas se encuentra de manera dispersa, y con frecuencia no se indica cómo se calculó la información [1, 2, 3, 4, 5, 6].

En este trabajo se realiza un análisis de las definiciones de contenido de humedad así como algunos aspectos relacionados con las relaciones de equivalencia entre el contenido de humedad en base húmeda y base seca. También se derivan algunas ecuaciones que se pueden aplicar en los procesos de humectación y secado.

## 1. DEFINICIÓN Y EXPRESIONES DE CONTENIDO DE HUMEDAD

En general el término “humedad” se usa para describir la cantidad de agua que tienen los materiales o sustancias.

Debido a que la mayoría de los materiales sólidos están constituidos de materia seca y agua, se puede establecer que la masa total ( $m_h$ ) del material es igual a la suma de su masa seca ( $m_s$ ) y de su masa de agua ( $m_{H_2O}$ ).

$$m_h = m_s + m_{H_2O} \quad (1)$$

En materiales sólidos en los que hay absorción o evaporación de agua la masa de agua cambia, sin embargo su masa seca se mantiene constante.

La masa de agua presente en un material es una propiedad extensiva y su valor está en función del “tamaño” del material. La medición de la masa de agua en materiales de gran masa resulta complicado, tal es el caso del comercio de granos donde las “cargas” son de cientos de toneladas.

Para superar esta dificultad, esta propiedad extensiva (masa de agua) se convierte en una propiedad intensiva al expresarla por unidad de otra masa. La nueva propiedad se conoce como contenido de humedad y es independiente del “tamaño” del material. Por lo anterior, el análisis de contenido de humedad en masas grandes del mismo material se puede realizar en una muestra de ellas, sin alterar su valor.

El contenido de humedad se puede expresar de dos maneras:

1.1 Contenido de humedad en base seca: es el cociente entre la masa de agua en el material y su masa seca.

$$\%H_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \cdot 100 \quad (2)$$

El contenido de humedad  $H_{bs}$  “compara” la masa de agua que contiene un material sólido con su masa seca. Por ejemplo un valor  $H_{bs} = 200\%$  significa que la masa de agua presente en el material es 2 veces su masa seca.

Cuando el material está constituido de materia seca y muy poca masa de agua se espera que el valor de contenido de humedad se aproxime a cero (0 % bs). En materiales con alto contenido de humedad, esta definición no permite identificar cuando el material se encuentra saturado de agua.

Para establecer los límites de  $H_{bs}$  se realiza el siguiente análisis: si se disminuye la masa de agua en el material en el límite  $m_{H_2O} \rightarrow 0$ , entonces  $H_{bs} \rightarrow 0$  (cota inferior). Por otro lado, para materiales con alto contenido de agua (como frutas y verduras), se observa que el valor de  $H_{bs}$  se incrementa de manera proporcional a la masa de agua. Para aquellos materiales cuya masa seca es pequeña ( $m_s \ll m_{H_2O}$ ), se observa que el valor de  $H_{bs}$  se incrementa sin límite, por esta razón no es posible obtener una cota superior para  $H_{bs}$ .

1.2 Contenido de humedad en base húmeda: es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total.

$$\%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} \cdot 100 \quad (3)$$

Aquí, el contenido de humedad representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total ( $m_h$ ). En esta ecuación la masa de agua es una fracción de la masa total, es decir la masa de agua es menor o igual a la masa total del material. La definición de  $H_{bh}$  permite identificar de manera “intuitiva” el punto en el cual el material sólo está constituido por materia seca (0 %) y el punto en el que sólo está constituido de agua (100 %).

Un análisis similar al realizado para  $H_{bs}$  permite observar que en el límite  $m_{H_2O} \rightarrow 0$ , entonces  $H_{bh} \rightarrow 0$ , y para materiales que cumplen  $m_{H_2O} \gg m_s$ , entonces  $H_{bh} \rightarrow 100$ .

En las ecuaciones para  $H_{bs}$  y  $H_{bh}$  la masa de agua se puede calcular indirectamente de la masa de la muestra sin secar y su masa seca.

## 2. RELACIONES DE EQUIVALENCIA

De las ecuaciones (2) y (3) se pueden derivar algunas relaciones de equivalencia entre  $H_{bs}$  y  $H_{bh}$ :

$$\%H_{bh} = \frac{\%H_{bs}}{(100 + \%H_{bs})} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\%H_{bs} = \frac{\%H_{bh}}{(100 - \%H_{bh})} \cdot 100 \quad (5)$$

$$\%H_{bs} = \frac{m_h}{m_s} \cdot \%H_{bh} \quad (6)$$

Estas relaciones de equivalencia permiten convertir un valor de  $H$  de una base a otra y son independientes de la masa del material (ecuaciones 4 y 5). La ecuación (6) permite realizar la conversión entre ambas bases incluyendo la masa húmeda y la masa seca del material.

Al evaluar numéricamente las relaciones de equivalencia anteriores se encuentra que para materiales con bajos contenidos de humedad (menores que 3 %, bh o bs), los valores en ambas bases es similar. La máxima diferencia entre ambos es menor a 0.1 y es independiente de la masa del material, en este intervalo el efecto por la base puede despreciarse.

Para evaluar pequeños cambios de  $H_{bh}$  y su relación con los cambios en  $H_{bs}$  se usa la ecuación (4) y se calcula  $\Delta\%H_{bh} = \%H_{2bh} - \%H_{1bh}$ , de donde se obtiene,

$$\Delta\%H_{bh} = \frac{100^2 \Delta\%H_{bs}}{[100 + \%H_{2bs}][100 + \%H_{1bs}]} \quad (7)$$

Cuando  $\Delta\%H_{bh}$  es muy pequeño  $\Delta\%H_{bh} \rightarrow d\%H_{bh}$ , es decir,

$$d\%H_{bh} = \left\{ \frac{100}{100 + \%H_{bs}} \right\}^2 d\%H_{bs} \quad (8)$$

Desde el punto de vista metrológico la ecuación (8) expresa la incertidumbre de la conversión [7] y se puede escribir como:

$$u\%H_{bh} = \left\{ \frac{100}{100 + \%H_{bs}} \right\}^2 u\%H_{bs} \quad (9)$$

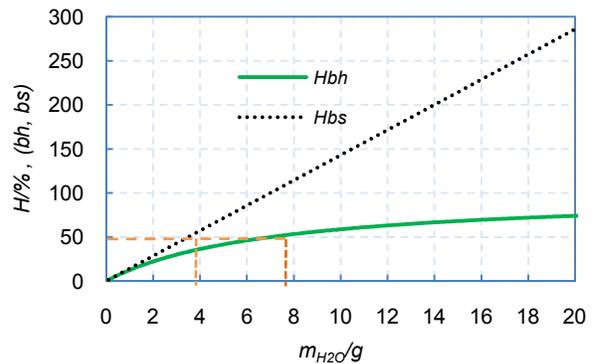
Donde  $u\%H_{bh}$  y  $u\%H_{bs}$  son las incertidumbres del contenido de humedad en base húmeda y en seca respectivamente.

El término,  $\{100/(100+\%H_{bs})\}^2$  es el coeficiente de sensibilidad  $0 \leq \partial\%H_{bh}/\partial\%H_{bs}$ , el cual muestra que a medida que  $H_{bh}$  aumenta  $H_{bs}$  también aumenta pero en mayor proporción, ya que también  $\partial\%H_{bh}/\partial\%H_{bs} \leq 1$ .

Los valores de incertidumbre conservan el orden de la relación entre  $H_{bs}$  y  $H_{bh}$ , es decir,  $uH_{bs} \geq uH_{bh}$ .

### 3. COMPARACIÓN DE HBS Y HBH

Para comparar las expresiones de  $H_{bs}$  y  $H_{bh}$ , se calcularon los valores de  $H_{bs}$  y  $H_{bh}$  como función del contenido de agua. Se consideró un material cuya masa seca es  $m_s=7$  g y una masa de agua entre 0 g y 20 g. La gráfica (figura 1) muestra el comportamiento del contenido de humedad en ambas bases.



**Figura 1.** Contenido de humedad en base húmeda ( $H_{bh}$ ) y en base seca ( $H_{bs}$ ) como función de la masa de agua ( $m_{H_2O}$ ) en ella para una muestra con  $m_s=7$  g.

Las expresiones del contenido de humedad  $H_{bs}$  y  $H_{bh}$  tienen sus ventajas y desventajas, de acuerdo a su uso:

- Para propósitos de calibración, desarrollo de instrumentos y operaciones comerciales es más conveniente usar la definición de  $H_{bh}$  ya que con ella se obtiene una escala en un intervalo bien definido (de 0 % a 100 %, ver figura 1), lo cual facilita la generación de curvas de calibración en los instrumentos [2,3]. Adicionalmente, en los procesos de

humectación y secado, el cálculo de masa de agua o cambio de contenido de humedad se facilita al usar la base húmeda.

- Para aplicaciones relacionadas con la investigación de procesos de humectación o secado, es conveniente usar  $H_{bs}$  ya que está referida a la masa seca, , además permite expresar  $H_{bs}=k \cdot m_{H_2O}$  ( $k$ =constante), es decir,  $H_{bs}$  cambia de manera proporcional con la masa de agua (figura 1) [2,3].

No obstante que los campos de aplicación de cada una de las definiciones se encuentran claramente identificados [2, 3, 4, 5, 6], en la práctica y para cualquier aplicación se puede emplear cualquier definición. El criterio de uso se restringe a los datos disponibles para realizar los cálculos.

Por otro lado, para obtener una relación que permita comparar claramente la masa de agua que contienen dos materiales se hace el siguiente análisis:

Considere dos materiales de igual masa ( $m_h$ ), uno de los cuales tiene un valor  $H_{bh}$  (base húmeda) y el otro un valor  $H_{bs}$  (en base seca), si se cumple que  $H_{bh}=H_{bs}$ , ¿Cuál es la relación que guardan sus masas de agua?

Considere que el material 1 tiene una masa total  $m_h$  y cuya masa seca es  $m_{s1}$ , si su contenido de humedad se expresa en base húmeda, entonces se tiene,

$$H_{bh} = \frac{m_h - m_{s1}}{m_h} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} \quad (10)$$

Por otro lado considere que material 2 tiene una masa total  $m_h$  y cuya masa seca es  $m_{s2}$ , si su contenido de humedad se expresa en base seca, entonces,

$$H_{bs} = \frac{m_h - m_{s2}}{m_{s2}} = \frac{m_{2H_2O}}{m_{s2}}$$

La ecuación anterior se puede escribir como:

$$H_{bs} = \frac{m_{2H_2O}}{(m_h - m_{2H_2O})} \quad (11)$$

Dado que  $H_{bh}=H_{bs}$ , al igualar las ecuaciones (10) y (11), se obtiene:

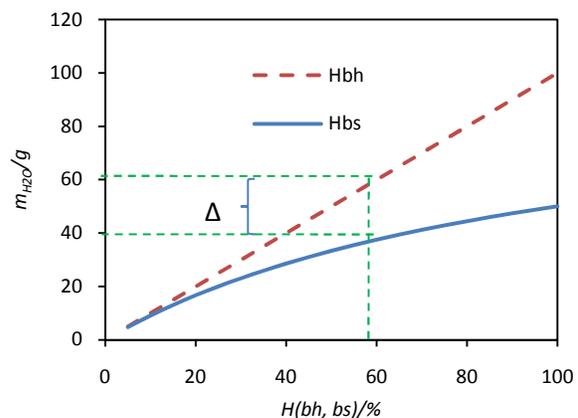
$$m_{2H_2O} = \frac{m_h \cdot m_{1H_2O}}{(m_h + m_{1H_2O})} \quad (12)$$

Luego se tiene lo siguiente:

$$\frac{m_{2H_2O}}{m_{1H_2O}} = \frac{m_h}{(m_h + m_{1H_2O})} \leq 1 \quad (13),$$

Por lo que se cumple que  $m_{1H_2O} \geq m_{2H_2O}$ , es decir, la masa de agua del material 1 es mayor o igual que la del material 2. En otras palabras si se comparan dos materiales con igual masa total, uno con contenido de humedad  $H_{bs}$  y el otro con  $H_{bh}$ , si  $H_{bs}=H_{bh}$ , entonces "el material cuyo valor está expresado en base húmeda tiene mayor masa de agua que el expresado en base seca".

En la figura 2 se muestra una gráfica que ilustra el resultado anterior. Para generar esta gráfica se consideró una masa  $m_h= 100$  unidades de masa y un contenido de humedad desde 0 % a 100 % en ambas bases. Para cada base se calculó la masa de agua correspondiente. La línea punteada vertical considera el caso cuando  $H_{bs}=H_{bh}$  y las horizontales las masas de agua en cada base.  $\Delta$  es la diferencia en masa de agua cuando los contenidos de humedad en ambas bases son iguales.



**Figura 2.** Diferencia en masa de agua para dos muestras con contenido de humedad y masa similares.

Por ejemplo, si una "carga" de maíz de 2.5 ton tiene contenido de humedad 34 % y no se indica la base de masa, entonces la masa de agua que presente en el material es 850 kg si el contenido de humedad está dado en base húmeda, y  $\approx$  634 kg si está dado en base seca. Si el valor del contenido de humedad

se aproxima a 100 % la diferencia en masa de agua es aproximadamente la mitad de la masa total.

En otras palabras, si se tiene un material (de masa  $m_h$ ) cuyo contenido de humedad está dado por %H, si no se indica la base y se supone que %H está dado en base húmeda (cuando en realidad está dado en base seca), entonces la masa de agua calculada será mayor a la masa de agua que contiene el material. La diferencia en la masa de agua depende del valor de %H<sub>i</sub> y puede alcanzar hasta un 50% de la masa del material.

El resultado anterior se puede obtener de las ecuaciones (10) y (11) al considerar que  $\Delta = m_{1H_2O} - m_{2H_2O}$ . Si se supone que el valor de H está dado en base húmeda,  $\Delta$  se puede escribir como:

$$\Delta = \frac{m_h \%H_{bh}}{100} - \frac{m_h \%H_{bh}}{100 + \%H_{bh}} \quad (14)$$

En el límite cuando %H<sub>bh</sub> → 100, se obtiene que:

$$\Delta_{max} = \frac{1}{2} m_h \quad (15)$$

Este resultado se obtiene en el intervalo en el que los valores de H<sub>bs</sub> y H<sub>bh</sub> están definidos, es decir en el intervalo de 0 % a 100 %. En valores mayores de 100%, H<sub>bh</sub> no tiene sentido, por lo que el análisis no se puede realizar.

#### 4. APLICACIONES

El contenido de humedad es importante en los procesos que involucran absorción o evaporación de agua. Se derivan expresiones para describir el cambio de contenido de humedad de diversos materiales.

Si se considera un material de masa  $m_h$  y un contenido de humedad (bh) H<sub>i</sub>, el cual absorbe o evapora una masa de agua  $\delta_{H_2O}$ , entonces el material alcanza un contenido de humedad H<sub>2</sub>, el cual se puede escribir como:

$$\%H_f = \frac{(m_h + \delta_{H_2O}) - m_s}{(m_h + \delta_{H_2O})} \cdot 100 \quad (16)$$

De la ecuación (16) y de la expresión para H<sub>i</sub> se encuentran las dos ecuaciones de mayor

importancia en los procesos de humectación y secado, las cuales son:

$$\delta_{H_2O} = m_h \frac{(\%H_f - \%H_{i1})}{(100 - \%H_f)} \quad (17)$$

y

$$\%H_f = \frac{m_h \%H_i + 100\delta_{H_2O}}{(m_h + \delta_{H_2O})} \quad (18)$$

En las ecuaciones anteriores  $\delta_{H_2O}$  es la masa de agua que absorbió ( $\delta_{H_2O} > 0$ ) o evaporó ( $\delta_{H_2O} < 0$ ) el material.

La ecuación (17) calcula la masa de agua debido a un cambio de humedad de H<sub>i</sub> a H<sub>f</sub>.

La ecuación (18) es útil para calcular el cambio en el contenido de humedad debido a que el material absorbió o evaporó una masa de agua conocida ( $\delta_{H_2O}$ ).

Como aplicación considere una muestra de maíz blanco con un contenido de humedad H<sub>ibh</sub>=13.67 % y una masa m<sub>h</sub>=7.0100 g que se expone a un ambiente de 36 %HR y 22 °C, y que se mide continuamente su masa (m<sub>h</sub>+ $\delta_{H_2O}$ ) con una balanza analítica.

En la figura 3 se muestran los valores de H<sub>f</sub> calculados a partir de la ecuación (18).

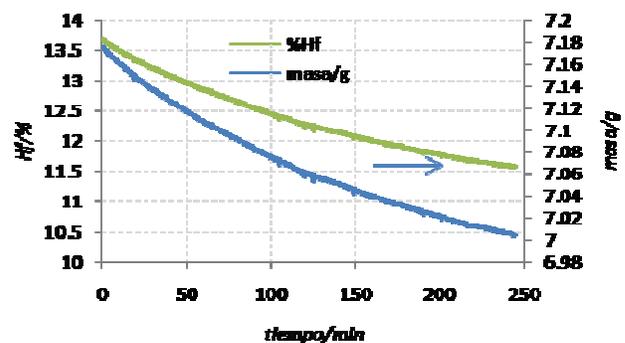


Figura 3. Cambio del contenido de humedad por el cambio de masa del material debido a condiciones ambientales.

Además de las aplicaciones mencionadas, las ecuaciones (17) y (18) son útiles en el campo de la metrología para acondicionar muestras a distintos niveles de contenido de humedad para propósitos de calibración de instrumentos.

Las ecuaciones (17) y (18) fueron derivadas usando la definición de contenido de humedad en base húmeda, sin embargo los mismos resultados se pueden obtener al usar el contenido de humedad en base seca.

## 5. CONCLUSIONES

El contenido de humedad es una propiedad que expresa la cantidad de agua que contiene un material y su valor es inequívoco cuando se especifica la base de la masa usada.

Si no se especifica la base, la diferencia alcanza un valor de hasta el 50 % de la masa del material. En otras palabras, si se supone equivocadamente que el valor de humedad está dado en base húmeda y la base correcta del cálculo es la base seca, entonces se concluye que el material tiene una masa de agua que es mayor a la que tiene en la realidad, lo cual es incorrecto. El resultado anterior se puede resumir como sigue: si se comparan dos materiales con igual masa, uno con contenido de humedad  $H_{bs}$  y el otro con  $H_{bh}$ , si  $H_{bs}=H_{bh}$ , entonces, *"el material cuyo valor está expresado en base húmeda tiene mayor masa de agua que el expresado en base seca"*.

Por otro lado, del análisis realizado a las dos expresiones para el contenido de humedad, se encuentra que  $H_{bh}$  permite obtener una escala acotada en el intervalo de 0 % a 100 %, por lo que es apropiada para aplicaciones como el intercambio comercial, desarrollo de instrumentos, calibración, etcétera, mientras que  $H_{bs}$  permite generar una escala lineal, pero tiene la dificultad de no tener una

cota superior, por lo que tiene mayor utilidad en investigación u otras áreas.

Las ecuaciones relacionadas con los procesos de humectación y secado presentadas son útiles para diversas aplicaciones tanto industriales como metrológicas.

## Referencias

- [1] Quinn F.C., The most common problem of moisture/humidity measurement and control; International symposium of Humidity and Moisture of 1985.
- [2] Brooker D.B., Bakker-Arkema F. W. and Hall C.W. en Drying and storage of grains and oilseeds, Van Nostrand Reinhold (1992).
- [3] Pixton S. W., Moisture content-Its significance and measurement in stored products, J. stored Prod. Res., vol. 3, pp.35-47. (1967).
- [4] ISO 712, Cereals and cereal products-Determination of moisture content-Reference method (2009).
- [5] BS 4289-8:1988 (ISO7700-2:1987), methods for the analysis of oilseeds- part 8: check of the calibration of moisture meters.
- [6] B. S. Sazhin, V.B. Sazhin, Scientific Principles of Drying Thechnology, Begell House Inc. New York 2007.
- [7] ISO GUM, 1993 "Guide to expression of the uncertainty in Measurement". BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML.