

Capítulo 8

Bases fisicoquímicas del transporte de humedad en madera y su implicación en la sostenibilidad de materiales lignocelulósicos en Oaxaca

Emilio Hernández-Bautista¹

Manolo Luis González-Jiménez¹

María de Jesús Gil-Gallegos¹

Gildardo Oswaldo García-Montalvo²

Evelyn Abigail Cruz-López³

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE26004891>



¹ Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México.

² Departamento de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México

³ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca, Oaxaca, México

Resumen

La humedad relativa (HR) en muchos estudios de procesos de secado no se considera una variable principal. Sin embargo, está directamente relacionada con la concentración de vapor en la cámara de secado, en la superficie del material y, en menor medida, en el dominio del material al final del proceso, dentro del régimen higroscópico. Dado que la principal fuerza impulsora del flujo de masa es la diferencia de concentración de vapor entre los alrededores (HR) y la superficie del material, la HR juega un papel importante al relacionar el límite con las condiciones del entorno. El objetivo de este trabajo es analizar el transporte de vapor de agua relacionado con la humedad relativa del medio poroso, la frontera y la cámara de secado durante el proceso de secado por debajo de los 100 °C. En este capítulo se realiza un análisis de las ecuaciones que describen el transporte de vapor relacionadas con la humedad relativa, en el dominio, la frontera y los alrededores (cámara de secado). Tomando como ejemplo un dominio de madera de pino con la condición de secado convectivo. En este dominio se calcula la concentración de vapor en un sistema multiescala a diferentes temperaturas.

1. Introducción

El entendimiento de medios porosos es un factor principal para su aprovechamiento y transformación. Los medios porosos como agro-materiales, entre los que se encuentran la madera y alimentos, son materiales que requieren la eliminación de agua para tener una mayor estabilidad dimensional y evitar el crecimiento microbiano (1).

El secado convectivo es un proceso en el cual se elimina el agua del medio. Los principales parámetros que afectan al secado son la temperatura, la velocidad del aire y la HR de la cámara (2). El proceso de transferencia de masa durante el secado se da principalmente en la

interfaz, donde la principal fuerza motriz es la concentración de agua en la superficie del material y la concentración de agua en la cámara de secado, la cual está ligada principalmente con la HR del medio.

La HR es la razón entre la presión de vapor en el medio y la presión de vapor de saturación a una temperatura determinada. La presión de vapor en el medio a una determinada temperatura solo puede alcanzar un valor máximo, que es la presión de vapor de saturación. Por lo que la HR solo podrá alcanzar valores entre 0 y 1 o, en porcentajes, valores de HR de 0 a 100 %. La HR no representa la concentración masa de humedad en el medio, por lo que esta no debe confundirse con el porcentaje de humedad, que es una razón en valores masa de humedad en el ambiente y humedad máxima en el ambiente que puede alcanzarse a esa temperatura (3). Los valores de humedad porcentual están relacionados con la masa y la HR está relacionada con las presiones parciales (4).

A partir del análisis de Zhang et al. (2021) (5) aplicado a experimentos de secado convectivo de frutas y vegetales, y basado en varios trabajos (6, 7), se concluye que durante el secado de materiales hay dos principales efectos de la HR en el secado. El primero es que incrementar la HR manteniendo la temperatura constante intensifica los procesos de transferencia de calor, mientras que disminuir la HR intensifica los procesos de transferencia de masa. Además, controlar la HR ayuda a evitar procesos de endurecimiento superficial y promover el desarrollo de conectividad porosa.

En el proceso de secado al vacío, la HR en los alrededores tiene una influencia muy importante, ya que, al tener un medio completamente sellado, la HR incrementa en la cámara de secado debido al flux másico eliminado del material; la humedad que sale del material se integra a los alrededores, incrementando la presión de vapor y al mismo tiempo la HR (8). Por lo que en este proceso es importante el control de la presión en la cámara (alrededores).

El control de la humedad en materiales lignocelulósicos como la madera tiene implicaciones directas en la salud pública, ya que condiciones inadecuadas de humedad favorecen el crecimiento de microorganismos (hongos y bacterias), afectando la calidad del aire interior y la durabilidad de viviendas en regiones como Oaxaca.

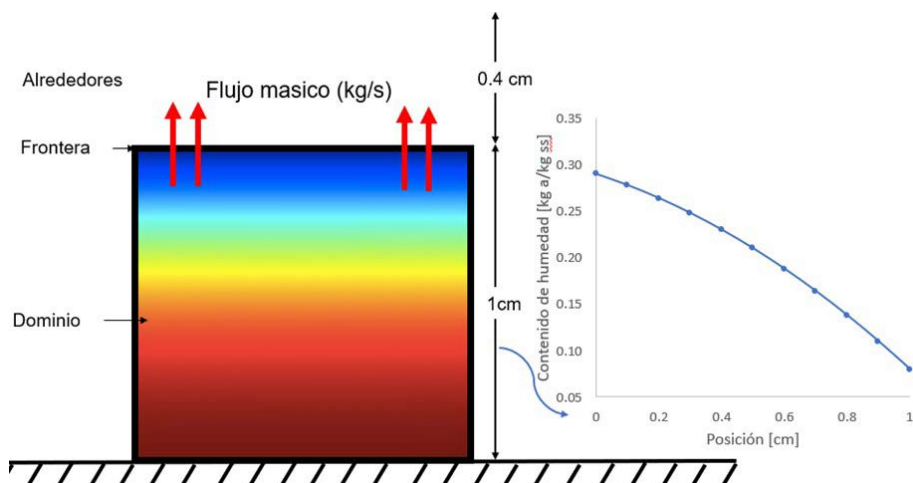
2. Objetivos

El objetivo de este capítulo es analizar el transporte de humedad del medio poroso (madera) hasta la cámara de secado. Se busca cómo expresar la concentración de vapor en el medio poroso para calcular la HR del medio, la frontera y la cámara de secado en función de variables primarias como contenido de humedad y temperatura, que usualmente se miden en procesos convectivos y del secado al vacío. Con la finalidad de tener un conjunto de ecuaciones propuestas que nos ayuden a entender el efecto de la HR en procesos de secado.

3. Materiales y métodos

En las ecuaciones de transporte de masa de tipo continuo, podemos dividir al sistema en dominio, fronteras y alrededores, en donde las fronteras las podemos relacionar con el dominio a través de las condiciones de la cámara de secado (alrededores). Como ejemplo para demostrar los mecanismos relevantes relacionados con la HR, partiremos de un sistema que cuenta con los elementos mencionados anteriormente.

Considerando que el sistema ya se encuentra en la región higroscópica. La Figura 1 muestra el medio poroso sometido a condiciones de secado convectivo. Las propiedades de este dominio representan a madera de pino, ya que es un material conocido, se muestra el dominio, las fronteras y las condiciones de la cámara de secado. Además, se muestra un perfil espacial de humedad en el interior del dominio que varía en dirección vertical. La frontera superior tiene un contenido de humedad menor que la inferior (9-10). Por lo cual, se supone un transporte de masa unidireccional. Las flechas presentan la dirección del flujo másico por unidad de área.

Figura 1. Medio poroso sometido a condiciones de secado y su perfil de secado.

Al tener menor contenido de humedad en las fronteras (contenido de humedad menor de 0.1), el flujo másico por unidad de área se desplaza de una zona de alta concentración a una zona de baja concentración, o de la parte inferior a la superior en la Figura 1. Al inicio del secado, la concentración de humedad en el dominio es homogénea. En este momento, la frontera, al estar en contacto con los alrededores, disminuye su concentración de vapor y se va formando el perfil de humedad en el dominio. Para poder describir este proceso en el medio poroso con ecuaciones de transporte como la ley de Fick o la ley de Darcy, se requiere saber cómo se calculan los valores de concentración de vapor en todo el sistema. También se requiere conocer cómo se relacionan las variables principales: temperatura, contenido de humedad y velocidad de aire con la HR, con el fin de describir correctamente la física del secado y saber cuáles son las variables más importantes en el proceso de secado que afectan la velocidad de transferencia de masa, su magnitud e importancia.

3.1 Humedad relativa en la cámara de secado

El aire de secado es una mezcla de aire seco y vapor de agua. Para describir esta mezcla en la cámara en función de sus concentraciones o presiones parciales, es necesario utilizar la ley de Dalton, que nos dice que la suma de las presiones parciales es igual a la presión total. Además, es necesario tener mediciones de la HR, así como de la presión total de la cámara de secado, que por lo regular es la presión atmosférica.

$$P_T = P_v + P_{\text{air}} \quad (1)$$

La ecuación 1 nos muestra la ley de Dalton, en donde conocemos la presión total del sistema, que es usualmente 1 atm, pero desconocemos la presión del aire seco y la presión de vapor en la cámara, sin embargo, esta última la podemos calcular utilizando la presión de vapor de saturación a la temperatura de secado. Esta la podemos conocer utilizando la ecuación de Antoine o también usando la relación de Dupré (4).

$$P_{v \text{ sat}} = 10^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (2)$$

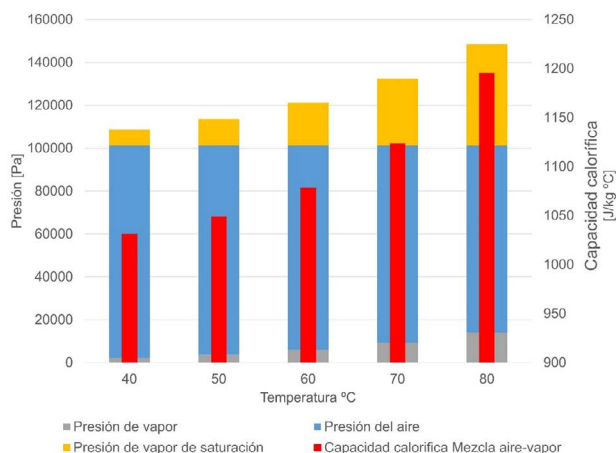
La ecuación 2 nos muestra la ecuación de Antoine, que nos predice la presión de vapor de saturación en función de la temperatura. La ecuación 2 nos dice que el logaritmo de presión de vapor de saturación es igual a una relación entre las constantes A, B, C y es inversamente proporcional a la temperatura. Las constantes para el caso del agua tienen los siguientes valores: $A = 8.0713$, $B = 1730.63$ y $C = 233.426$. Usando estos valores, la temperatura se sustituirá en grados centígrados y la presión de vapor saturado se obtiene en mmHg.

Sin embargo, como el sistema no está completamente saturado, multiplicaremos la presión de vapor de saturación por la actividad de agua (Ecuación 3) en la cámara de secado. Y utilizando la ecuación 1 podremos despejar la presión de aire seco y tener esta parte del sistema completamente caracterizada.

$$P_v = a_w \cdot P_{v \text{ sat}} \quad (3)$$

La Figura 2 muestra la presión de vapor ubicada en la parte baja de las barras en color gris y la presión de aire seco en la parte del centro en color azul en la cámara de secado; juntas suman 1 atm (101.325 kPa), que sería la presión total del sistema. Sin embargo, en la parte de arriba, en color amarillo, se añade el cálculo de la presión de vapor de saturación con el fin de compararla con la presión de vapor (gris). Además, se muestra la capacidad calorífica o calor húmedo de las muestras a diferentes temperaturas como una barra completa en color rojo.

Figura 2. Presión parcial en los alrededores a diferentes temperaturas.



Para calcular la presión de vapor en los alrededores, se propone un valor de HR en la cámara de secado de 30 %. Se muestra que, a medida que se incrementa la temperatura, el aire tiene más capacidad de almacenar humedad. Sin embargo, la cantidad de humedad en el aire también es función de la HR, si se compara la parte gris del fondo de las barras con la parte amarilla de arriba de las barras, que es HR al 100 %, o presión de vapor de saturación. Podemos ver que esta incrementa demasiado con la temperatura. En procesos de secado necesitamos que este valor sea más pequeño, ya que

el flux de humedad que sale del medio poroso es función de la diferencia de concentraciones en la superficie y el medio. Matemáticamente, sería lo que hay que tomar en cuenta; sin embargo, hay otros factores como el endurecimiento del material, el encostramiento o agrietamiento, que son factores propios del material (11), con los cuales se decide el valor de HR que es conveniente utilizar en la cámara de secado (12).

Usando la ley de gases ideales, se puede obtener la concentración de aire seco en la cámara y la concentración masa de vapor; esta última es muy importante debido a que en la frontera del material a usar podremos usar esta concentración en una fórmula análoga a la ley de Newton del enfriamiento, para poder obtener la condición frontera. Si se trabaja a temperatura constante en la cámara, podemos usar siempre esta concentración, pero si se trabaja con ciclos, se puede ver la variación de la concentración en función del ciclo de temperatura.

$$C_i = \frac{P_i \cdot M_{w_i}}{R \cdot T} \quad (4)$$

Donde i = vapor, aire seco, R es la constante de gases ideales 8314.46 [m³Pa/kgmol K], M_w es el peso molecular de la especie i , agua 18 [kg/kgmol] y T es la temperatura absoluta [K].

Por otra parte, si analizamos el calor húmedo en una mezcla de aire y vapor de agua, esta es la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de un kilogramo de aire seco más el vapor de agua presente en 1 K o 1 °C. Las capacidades caloríficas del aire y el vapor de agua se pueden suponer constantes en el intervalo normal de temperaturas e iguales a 1.005 kJ/kg aire seco·K y 1.88 kJ/kg de vapor de agua. K, respectivamente.

$$C_s = 1.005 + 1.88H \quad (5)$$

En la ecuación 5, H es el contenido de humedad del sistema en kg de agua sobre kg de aire seco. La Figura 2 muestra que, al incrementar la temperatura, manteniendo la HR constante, se incrementa la capacidad

calorífica del sistema. La humedad del sistema está relacionada con la HR; al incrementar la humedad del sistema, se incrementa la capacidad calorífica, mejorando los procesos de transferencia de energía mencionados por Zhang (2021) (5).

3.2 Humedad relativa en la interfaz

La condición frontera más común en muchos procesos de secado convectivo y del secado al vacío es la analogía de la ley de Newton del enfriamiento para transferencia de masa (13). La ecuación número 6 nos dice que el flujo másico es proporcional a un coeficiente de transferencia independiente de la concentración, multiplicado por la diferencia de concentración en la superficie del material menos la del ambiente. Esto para el caso del secado, ya que la ley de Newton no contempla la dirección; debemos ubicar primero la concentración más alta, que sería la de la superficie del material, y después la concentración más baja, que será la de la cámara.

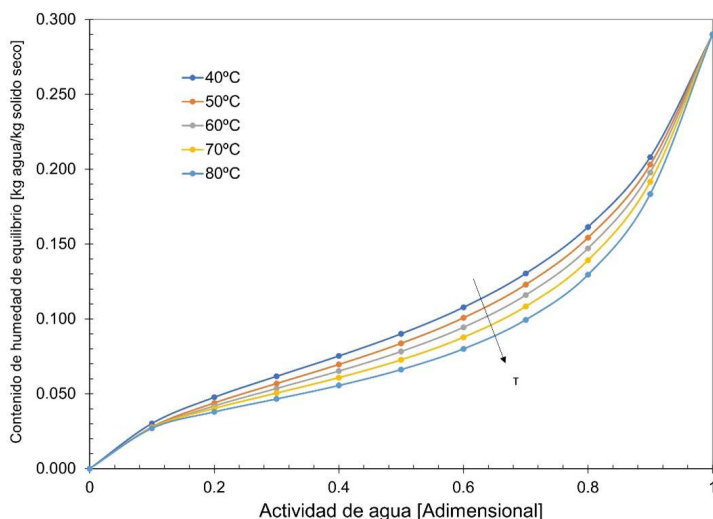
$$J_A^* = h_m(C_s - C_{amb}) \quad (6)$$

Donde C_{amb} es la concentración en la cámara; esta es calculada utilizando el procedimiento visto en la sección anterior. Para calcular la presión de vapor en la superficie del material y después convertirla a concentración C_s con la ecuación (4), es necesario el cálculo de la actividad de agua. Esta se calcula utilizando los valores de contenido de humedad (Figura 1), que los obtenemos con la ecuación de conservación de masa; esta ecuación se verá más adelante. El valor de contenido de humedad en la frontera varía en función de la temperatura y el tiempo; al principio será el mismo que en todo el dominio y, a medida que avanza el tiempo, se formará el perfil que se muestra en la Figura 1.

Otra condición necesaria para poder calcular la concentración en la superficie es suponer que la superficie del material llega muy rápido al equilibrio (2), por lo que podemos usar las isotermas de sorción para calcular la actividad de agua en la superficie del material y multiplicarla por la presión de vapor de saturación (ecuación 3). En la Figura 3 se

muestran isothermas de sorción de *Pinus pseudostrobus*, modeladas con la ecuación de GAB a diferentes temperaturas con la Ecuación 7. Se puede observar que, a medida que el contenido de humedad disminuye en la superficie, también lo hace la HR; así mismo, este fenómeno se ve ampliado con el aumento de temperatura.

Figura 3. Isothermas de sorción calculadas con la Ecuación 7.



$$w_{eq}(T, a_w) = \frac{x_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 + C \cdot K \cdot a_w - K \cdot a_w)} \quad (7)$$

Los parámetros C , x_m y K son propios del material y varían con la temperatura.

Una vez que se obtiene la HR a la temperatura y contenido de humedad de la superficie. Esta se multiplica por la presión de vapor de saturación (Ecuación 2). A la temperatura de la superficie. Obteniendo la presión de vapor y convirtiéndola a concentración con la Ecuación 4.

El coeficiente h_m de la Ecuación 6, coeficiente de transferencia de masa, se puede calcular utilizando el número de Sherwood y Lewis, dependiendo de las condiciones de secado, temperatura y velocidad del

aire. La variación de este coeficiente con la HR no es tomada en cuenta en ninguna de las relaciones empíricas. El coeficiente de transferencia de masa h_m (m/s) es calculado para la condición frontera; en la interfaz del sólido-gas; mediante la semejanza de los números adimensionales; donde el número de Prandtl es reemplazado por el número de Schmidt (Sc) y el número de Nusselt por el número de Sherwood (Sh).

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad \text{y} \quad Sh = \frac{h_m \cdot L_c}{D_{AB}} \quad (8-9)$$

D_{AB} = Coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire (m^2/s)

ν = Viscosidad cinemática del aire a una temperatura dada (m^2/s)

Para determinar el número de Sherwood (Ecuación 10) se utilizó la siguiente ecuación para flujo por convección forzada y para una geometría de placa plana con flujo laminar.

$$Sh = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad 0.6 < Sc \leq 50 \quad (10)$$

Para determinar el Coeficiente de difusión del vapor de agua en el aire a diferentes temperaturas se utilizó la correlación empírica (Ecuación 11) propuesta por Marrero y Mason (1972) (14).

$$D_{\text{vapor water-air}} = 1.8 \times 10^{-10} \frac{T^{2.072}}{P} \quad 280 \text{ K} < T \leq 450 \text{ K} \quad (11)$$

Donde T es la temperatura absoluta y P es la presión total del sistema.

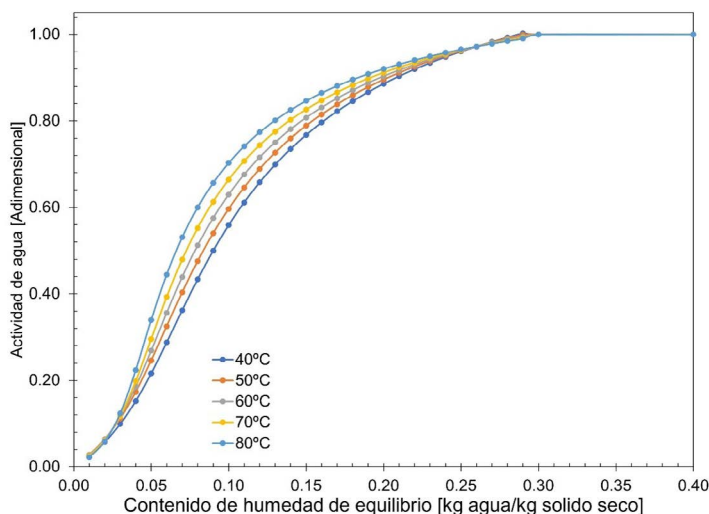
3.3 Humedad relativa en el dominio del material

La humedad en el dominio del medio poroso puede ser clasificada como agua libre, vapor de agua y agua ligada. Al principio, el agua libre estará dentro de los poros y será la primera en eliminarse durante el proceso de secado. Mientras los poros contengan agua en estado líquido (libre),

la presión de vapor en el dominio es igual a la presión de saturación, pues la actividad de agua será igual a 1 (Ecuación 3). En ese punto, la HR es del 100 % en los poros, dado que el sistema es una mezcla vapor de agua-aire y agua líquida. Esta última mantiene la saturación en los poros al 100 %. Una vez que el agua líquida se eliminó por completo, cuando se llega a un punto de humedad irreductible o, para la madera, punto de saturación de la fibra (15). Este punto es mostrado en la Figura 3, cuando la actividad de agua es 1; ahí solo queda agua ligada adherida a las paredes celulares y vapor de agua, la cual tiene como fuente de agua para mantenerse el agua ligada, por lo que están relacionados con la Ecuación 3.

El punto de saturación de la fibra para la madera de pino está aproximadamente a un valor de contenido de humedad de 0.28 kg de agua/kg de sólido seco. Este es el punto en donde contienen aún una cantidad de agua libre (saturación mayor a 0) y, por lo tanto, la actividad de agua aún se mantiene con un valor de 1. Debajo de este punto, la HR en los poros comienza a disminuir a diferente rapidez, que depende de la temperatura, como se muestra en la Figura 4. Estos valores son obtenidos utilizando la Ecuación 6, y despejando la actividad de agua de tal manera que se obtiene una función de $a_w(T, CHE)$. La isoterma de GAB, al ser una ecuación cuadrática, tiene dos raíces; por lo tanto, solo una de estas modela la actividad de agua en función de temperatura y contenido de humedad. Como se muestra en la Ecuación 12.

$$a_w(w_{eq}, T) = \frac{\sqrt{C} \cdot \sqrt{C \cdot w_{eq}^2 - 2(C-2) \cdot x_m \cdot w_{eq} + C \cdot x_m^2} + (C-2) \cdot w_{eq} - C \cdot x_m}{2(C-1) \cdot K \cdot w_{eq}} \quad (12)$$

Figura 4. Isotermas de sorción calculadas con la ecuación 6.

En la Figura 4, se observa que, a contenidos de humedad por encima de 0.28, la presión de vapor calculada con la Ecuación 3 es la presión de vapor de saturación. Y esta comenzará a disminuir debajo de este valor. La actividad de agua en los poros en un proceso de secado no disminuye hasta un valor de 0. Esta tiende a equilibrarse con el valor de actividad de agua de los alrededores. Esto sucede en la Ecuación 6, donde la concentración de vapor en la superficie llegará a un punto donde será igual a la concentración de vapor en la cámara y, por lo tanto, el flux másico tiende a 0; por lo tanto, no hay transferencia de masa entre el dominio y los alrededores; es ahí donde se equilibran las concentraciones.

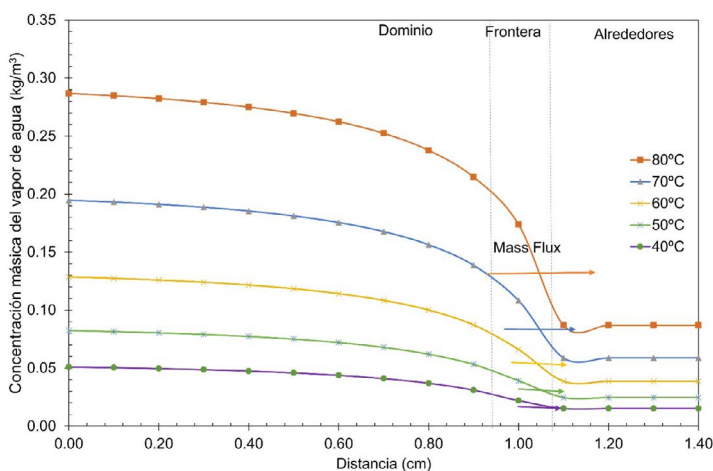
4. Resultados y discusiones

Se utilizaron las ecuaciones anteriores, así como un perfil de humedad que se muestra en la Figura 1 y una HR del 30 % en la cámara, para calcular la concentración del vapor en el dominio madera (0-0.90 cm), frontera (1 cm) y alrededores (1.1-1.4 cm). La presión de vapor de saturación se calculó usando la ecuación de Antoine (Ecuación 2) primero a la temperatura de 80 °C, considerando un sistema isotérmico. La actividad de

agua se obtuvo usando la isoterma de GAB despejada (ecuación 12) para el dominio y la frontera y se fijó una humedad relativa del 30 % para los alrededores. La presión de vapor se obtiene con la ecuación de Raoult (Ecuación 3) y esta presión parcial se convierte a concentración con la Ecuación 4. Estos cálculos se repitieron para las demás temperaturas.

En la Figura 5, se muestran concentraciones de vapor en procesos isotérmicos, se muestra que al incrementar la temperatura hay un incremento en la concentración de vapor, principalmente en el dominio. En las secciones con mayor contenido de humedad hay mayor incremento en la presión de vapor por la disponibilidad de agua ligada, como es el caso de la parte inferior que se muestra en la Figura 1. Sin embargo, a medida que nos acercamos a la superficie esta tiende a disminuir hasta llegar a la frontera.

Figura 5. Perfil de concentración de vapor en el dominio frontera y alrededores a diferentes temperaturas de secado.



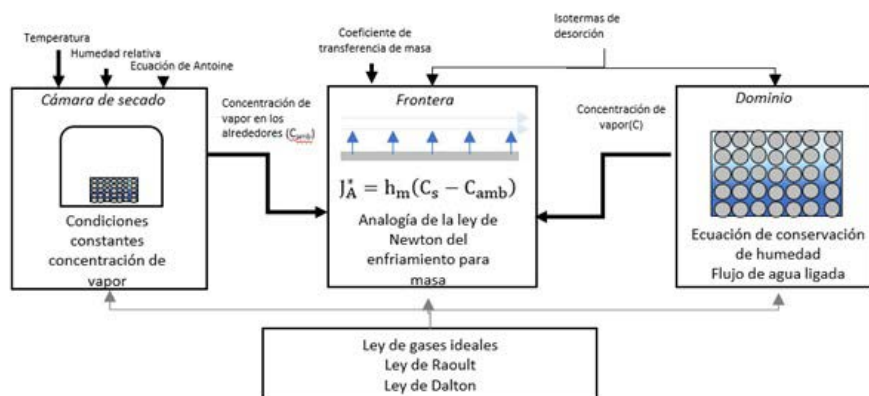
En la frontera, la variación de la concentración de vapor depende también del contenido de humedad en ese punto. Es necesario decir que dicho perfil se obtiene directamente de la ecuación de conservación de humedad en el dominio del material; esta utiliza como condición frontera la Ecuación 6. Por lo que el cálculo de la concentración de vapor en la superficie es necesario para obtener el perfil de distribución de humedad. Por lo regular, la analogía para la ley de Newton del enfriamiento se aplica para los puntos 1 y 1.1.

En la Figura 5 se muestra que en la frontera la diferencia entre las concentraciones de vapor en los puntos 1 y 1.1 tiende a disminuir con la disminución de la temperatura; esto también hace que disminuya la cantidad de flux másico en la frontera. Otro parámetro que también se toma en cuenta en el flux másico es el coeficiente de transferencia de masa; este depende directamente del número de Schmidt, que es proporcional directamente a la velocidad del aire y de manera indirecta a través del Reynolds. Además, es inversamente proporcional de manera indirecta a la temperatura a través del coeficiente de difusividad aire-vapor de agua.

Por lo que, incrementar la temperatura aumenta la diferencia de concentraciones, pero incrementar la velocidad aumenta el coeficiente de transferencia de masa en la superficie y este tiene menor impacto en el flux másico.

Por último, la concentración de vapor en los alrededores incrementa con el aumento de temperatura, pero tiene un mayor impacto el incremento en la HR del medio en la concentración de vapor. Sin embargo, para favorecer el secado, es importante disminuir las concentraciones en los alrededores, tomando en cuenta también los efectos de un flux másico grande en la superficie que puede llegar a causar alteraciones. En la Figura 6 se muestra la dependencia de estas variables mencionadas.

Figura 6. Relación entre el contenido de humedad y la humedad relativa (actividad de agua).



5. Conclusiones

Se mostraron las expresiones que describen la concentración de vapor en la cámara, la frontera y el dominio del medio poroso. Que están basados en la ley de Dalton, la ecuación de Clausius-Clapeyron y la ley de Raoult, y muestran la relación de las mezclas aire-vapor en los procesos de secado.

Se muestra que la temperatura tiene un efecto grande en el flux másico en la frontera, de incremento en la diferencia de concentraciones y en la disminución del coeficiente de transferencia de calor, pero al final domina la diferencia de concentraciones en el flux másico. La HR no es tomada en cuenta en las relaciones empíricas de los coeficientes de transferencia de masa, debido a que en muchos estudios el efecto es considerado como despreciable.

Por otra parte, la HR en los alrededores solo depende de la temperatura en la cámara de secado. La cual puede aumentar con respecto a la temperatura, pero también depende de la disponibilidad de agua en el ambiente.

6. Referencias

1. Younsi R, Kocaefe D, Poncsak S, Kocaefe Y. Computational modelling of heat and mass transfer during the high-temperature heat treatment of wood. *Appl Therm Eng.* 2007;27(8-9):1424-31. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.10.025>
2. Sadoth ST. Mathematical modeling of the conventional drying of wood. *Madera Bosques.* 2009;15(1):75-89. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1511198>
3. McCormick PY, Mujumdar AS. Drying. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.* Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc.; 2004. p. 195-226. <https://doi.org/10.1002/0471238961.0418250913030315.a01.pub2>
4. Jannot Y. Humid air. *Lect Notes Phys.* 2022;994:1-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90442-5_1
5. Zhang WP, Yang XH, Mujumdar AS, Ju HY, Xiao HW. The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables: a review. *Dry Technol.* 2021;39(15):1733-50. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1943669>

6. Sabudin S, Hakimi Remlee MZ, Mohideen Batcha MF. Effect of relative humidity on drying kinetics of agricultural products. *Appl Mech Mater.* 2014;699:257-62. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.699.257>
7. Darici S, Şen S. Experimental investigation of convective drying kinetics of kiwi under different conditions. *Heat Mass Transfer.* 2015;51(8):1167-76. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1487-x>
8. Xiao H, Cai YC. Factors affecting relative humidity during wood vacuum drying. *J For Res.* 2009;20(2):165-7. <https://doi.org/10.1007/s11676-009-0029-8>
9. Whitaker S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Adv Heat Transf.* 1977;13:119-203. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70223-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70223-5)
10. Crank J. *The mathematics of diffusion.* Oxford: Oxford University Press; 1979.
11. Shahari N, Hibberd S. Mathematical modelling of shrinkage effect during drying of food. In: 2012 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering (CHUSER). Piscataway (NJ): IEEE; 2012. p. 249-54. <https://doi.org/10.1109/CHUSER.2012.6504319>
12. Gulati T, Datta AK. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. *J Food Eng.* 2015;166:119-38. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031>
13. Krabbenhoft K, Damkilde L. A model for non-Fickian moisture transfer in wood. *Mater Struct.* 2004;37(273):615-22. <https://doi.org/10.1617/14036>
14. Marrero TR, Mason EA. Gaseous diffusion coefficients. *J Phys Chem Ref Data.* 1972;1(1):3-118.
15. Babiak M, Kúdela J. A contribution to the definition of the fiber saturation point. *Wood Sci Technol.* 1995;29(3):217-26. <https://doi.org/10.1007/BF00204589>

*Bases bioquímicas de la salud pública y su rol en la sostenibilidad regional de
Oaxaca.*

*Se terminó de imprimir en agosto de 2026
en los talleres gráficos de Astra Ediciones
Av. Acueducto 829, Colonia Santa Margarita, C. P. 45140,
Zapopan, Jalisco*

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

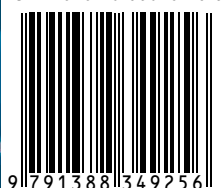
www.astraeditorialshop.com

*Impresión digital con interiores en papel bond 75g.
portada en cartulina sulfatada 12 pts.
El tiraje consta de 100 ejemplares*

Este libro, "**Bases bioquímicas de la salud pública y su rol en la sostenibilidad regional de Oaxaca**", es un compendio que subsana esta carencia de conocimiento de forma crítica y rigurosa. El texto propone a la bioquímica como una disciplina que analiza la información para caracterizar, diagnosticar y mitigar los problemas del desarrollo de la humanidad y su efecto sobre el medio ambiente a escala regional.

A través de ocho capítulos que van desde toxicología ambiental y la genómica poblacional hasta la bioprospección y la modelación computacional, este ejemplar se ofrece como un medio de conocimiento científico orientado al desarrollo de estrategias basadas en evidencia.

ISBN: 979-13-88349-25-6



9 791388 134925 6



Consulta y descarga



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



astra
editorial