



## Pine wood drying at high temperatures

Mario Matiauda<sup>1</sup>, Juan B. de León Benítez<sup>2</sup>, Nora Freaza<sup>2</sup>, Marta Rivero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Argentina

<sup>2</sup>Facultad de Química Farmacia. Universidad Central de Las Villas; Carretera a Camajuaní km 5 y ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. \*Correspondencia autores: J.B. de León: Tel. 05342281458;

\*juanba@uclv.edu.cu, matiauda@fceqyn.unam.edu.ar, nfreaz@yahoo.com.ar, rivero@fceqyn.unam.edu.ar

### ABSTRACT

The paper proposes a model to simulate the drying of pine wood at elevated temperatures, considering the phenomena of heat transfer and mass involved in the operation, establishing a comparison with experimental results, with the determination of the evolution of the moisture content and temperature in the wood, from the numerical resolution of the differential model.

Keywords: drying, model, Wood.

## Secado de madera pino a temperaturas elevadas

### RESUMO

El trabajo propone un modelo que simula el secado de madera de pino a temperaturas elevadas, considerando los fenómenos de transferencia de calor y masa intervinientes en la operación, estableciendo su comparación con los resultados experimentales, con la determinación de la evolución del contenido de humedad y temperatura en la madera, a partir de la resolución numérica del modelo diferencial.

Palabras claves: secado, modelo, madera.

### I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se han desarrollado diversos modelos matemáticos buscando representar el secado de madera a altas temperaturas.

Condujeron sus investigaciones del secado a altas temperaturas en maderas blandas y duras en un amplio rango de condiciones externas del flujo de aire húmedo y vapor sobrecalentado, basando su desarrollo en el análisis de la transferencia de calor y masa de los tres períodos de secado [1]. Pang<sup>(2)</sup> estudió la influencia del flujo convectivo de vapor de humedad y su predominancia sobre el flujo difusivo [2]. Efectuó un modelo de simulación del secado de albura de madera blanda, prestando particular consideración al gradiente de humedad desarrollado durante el secado [3]. Desarrollaron la simulación y control del proceso de secado en madera, asumiendo un modelo interno con cuatro períodos de secado junto a sus ecuaciones de modelización matemática [4]. Idearon modelos numéricos 2D

para predecir la transferencia de calor y masa durante el secado convectivo [5-6-7].

En el presente trabajo se plantea como objetivo la formulación de un modelo de secado a altas temperaturas para madera de pino elliottii.

### II. DESARROLLO

#### II.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA DURANTE EL SECADO

Las ecuaciones básicas para los fenómenos de transporte producidas por fuerzas termodinámicas:

$$\rho_s \frac{\partial X_i}{\partial t} = - \operatorname{div} J_i + I_i \quad (1)$$

Donde

$i$  = fases vapor, líquido, gas o hielo

$\rho_s$  = densidad del sólido seco  
(kg ss/m<sup>3</sup>)

$X$  = contenido de humedad en base seca (kg agua/kg ss)

$t$  = tiempo (s)

div = vector divergencia

$J_i$  = densidad de flujo másico  
(kg/m<sup>2</sup>s)

$I_i$  = fuentes o sumideros másicos de la fase  $i$  debido a la transición de fase

$$\sum_i I_{i=0} \text{ (kg/m}^3\text{s)}$$

Cuando se utiliza la ecuación (1) se supone que la contracción es despreciable por la pérdida de masa. La temperatura de la matriz del sólido puede considerarse igual en cualquier fase del material, o sea que el vapor en los capilares está en equilibrio termodinámico con el líquido.

Para la transferencia de calor, se tiene la ecuación conservativa :

$$\frac{c\rho_s\partial T}{\partial t} = -\text{div } q + \sum_i h_i I_i \quad (2)$$

Siendo:

$c$  = calor específico húmedo ( J/kg°C)

$h_i$  = entalpía (J/kg)

$T$  = temperatura (°C)

$q$  = densidad de flujo de calor (J/m<sup>2</sup>s)

Para temperaturas 0°C,  $X_{hielo} = 0$

Al no existir conversión química del gas inerte ( $I_g = 0$ ) y para temperaturas sobre 0°C, las conversiones de fase corresponden a la transición de líquido en vapor ( $I_l = -I_v$ ).

Llevando  $X$  a la ecuación (1), esta dará:

$$\frac{\rho_s\partial X}{\partial t} = \sum_i \text{div } J_i = \text{div } J_m \quad (3)$$

De las ecuaciones (1) y (2) y usando la ecuación de calor de Fourier se obtienen las ecuaciones de transferencia de calor y masa., que presentarán formas particulares según situaciones especiales que se consideren en el modelado y sus supuestos.

Suponiendo que no existe gradiente de presión total en el sólido, si la humedad y temperatura se toman como potenciales de la transferencia de masa y calor y si se consideran que los flujos están linealmente relacionados con las fuerzas termodinámicas, se tendrá para difusión no isotérmica:

$$J_i = -D_i\rho_s\nabla X_i + D_i\rho_s\delta_i\nabla T \quad (4)$$

Entonces

$$J_m = \sum_i J_i = D\rho_s\nabla X + D\rho_s\delta\nabla T \quad (5)$$

Siendo

$D$  = difusividad (m<sup>2</sup>/s)

$\delta$  = coeficiente termogradiante (°C<sup>-1</sup>)

Debe aclararse que la transferencia de calor depende tanto de la conducción térmica como de la redistribución de masa ( efecto Dufour) y que la transferencia de masa queda determinada por las diferencias en concentración de material como de la termodifusión (efecto Soret), pero se pueden considerar a las contribuciones cruzadas con coeficientes fenomenológicos (conductividades) idénticos.

En los procesos transitorios la fuente de masa de vapor o sumidero de líquido se expresan por:

$$I_{vl} = -I_{lv} = \epsilon\rho_s\frac{\partial X}{\partial t} \quad (6)$$

Siendo

$\epsilon$  = factor de conversión de fase

Si las propiedades termodinámicas y difusividades de masa y térmica se toman independientes de las coordenadas del sólido, quedará para  $T$  y  $X$  :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_t\nabla^2 T + \frac{\epsilon\lambda}{c}\frac{\partial X}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D\nabla^2 X + D\delta\nabla^2 T \quad (8)$$

donde

$\lambda$  = calor latente (J/kg)

$D_t$  = difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)

está basado en las diferencias en  $X$ .

En el desarrollo se ha despreciado el efecto Dufour en la formulación del flujo de calor.

## II.2 MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

Este modelo incluye la evaluación de la distribución de contenido de humedad y temperatura del material que se seca, es decir que se ponderan valores locales, lo que conlleva a evaluar las conductividades en la transferencia de calor y masa durante la operación y en una dirección (espesor).

Justamente como las propiedades de transporte irán variando con el contenido de humedad y temperatura en el tiempo y espesor, la resolución del sistema diferencial parcial (7,8) implicará la adopción de una técnica numérica para su resolución y expresión de resultados.

Se plantean las ecuaciones en diferencias finitas explícitas para la transferencia de calor y masa durante el secado, bajo la consideración unidimensional en la dirección del espesor ( $z$ ), de modo que las derivadas espaciales y temporales (unidimensionales) se expresan por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta \left( \frac{\partial j_v}{\partial x} \right) \right] \frac{1}{c_p \rho_s} \quad (9. a)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial j}{\partial x} \quad (10 a)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cong \frac{T'_{i+1} - 2T'_i + T'_{i-1}}{\Delta x^2} + 0(\Delta x^{-2}) \quad (10 b)$$

Dado que el sistema en derivadas parciales es de segundo orden con dos variables, se hace necesario la definición de dos condiciones iniciales ( para el contenido de humedad y la temperatura) como dos condiciones de frontera (tipo Robin), donde los flujos se expresan por:

$$J_q = h(T_a - T_s) \quad (11.a)$$

$$J_m = K_c (Y_a - Y_s) \quad (11.b)$$

siendo  $J_q$  y  $J_m$  los respectivos flujos,  $T_a$  y  $T_s$  las temperaturas del aire y de la superficie de la madera respectivamente, con  $Y_a, Y_s$  humedad en equilibrio con la humedad del sólido en la superficie e  $Y_a$  humedad del aire respectivamente;  $K_c$  coeficiente externo de transferencia de masa.

La malla se divide en nodos igualmente espaciados en la dirección del espesor ( $z$ ), considerándose dominante esta dirección y simetría en las dos mitades del espesor; es decir que se plantean las ecuaciones para uno nodo exterior, nodos internos y un nodo central.

Entre las suposiciones se incluyen :la transferencia de calor y masa es unidimensional (espesor del material) y la forma geométrica corresponde a una placa plana, el material poroso es macroscópicamente homogéneo, despreciándose los efectos de contracción en la desorción; el equilibrio de fases y térmico local se da en toda situación, con idénticas temperaturas en las tres fases. Si existen agua líquida, vapor y agua adsorbida, ellas permanecen saturadas a la temperatura local; no existe gradiente de presión total en el cuerpo durante el secado.

Además, la migración de líquido a través del esqueleto sólido se da por difusión, con la difusividad como función del contenido de humedad y la temperatura; las condiciones externas

bajo las cuales evoluciona el secado permanecen constantes, pudiendo el secado plantearse en términos de dos períodos diferenciados: uno inicial con velocidad de evaporación constante comportándose como una superficie líquida libre y otro por debajo del contenido de humedad crítica (con cese de la capilaridad) con velocidad de evaporación decreciente.

En el caso del período de velocidad constante, la temperatura de la superficie de secado se asimila a la temperatura de bulbo húmedo de manera que el flujo de calor será proporcional a las diferencias de temperaturas del fluido y la superficie, y el coeficiente de transferencia de calor. Para el flujo másico se considera que es proporcional al coeficiente de transferencia de masa por las diferencias de humedad del aire y del aire saturado a la temperatura húmeda.

Los coeficientes de transferencia de calor y masa del lado del aire pueden considerarse constantes durante el proceso global de secado, bajo las condiciones externas de secado, y se encuentran relacionados por la analogía de Chilton–Colburn para el modelo de placa plana, a través de los números adimensionales  $Pr$  (Prandtl),  $Sc$  (Schmidt) y  $St$  (Stanton).

Respecto a otras propiedades, la conductividad térmica y la densidad del material se consideran funciones del contenido de humedad del mismo, la capacidad calorífica dependiente del contenido de humedad y la temperatura y el contenido entálpico variando con la temperatura.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### III.1 MATERIALES

Se empleó madera de pino *elliottii* proveniente de una misma plantación, de quince años de edad.

El aserrado se realizó en estado verde en establecimiento de la zona y posterior reaserrado para lograr las dimensiones de las muestras de estudio.

Las probetas de 100 x 300 mm, espesor variable en 40 y 25 mm, fueron colocadas en bolsas de polietileno impermeables durante cuatro días en busca de homogeneizar el contenido de humedad.

#### III.2 MÉTODO

En las pruebas de secado, según las temperaturas elegidas, se dispusieron en la forma indicada en la figura 1:

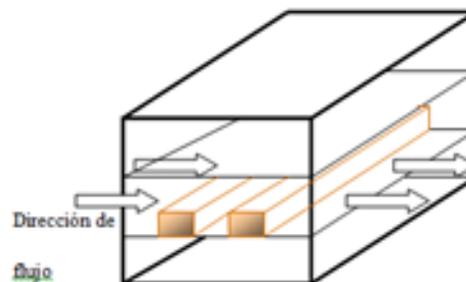


Figura 1: Testes de secagem, de acordo com as temperaturas escolhidas.

Las probetas fueron cubiertas con pintura especial aluminizada para altas temperaturas para su aislación a la pérdida de humedad en sus direcciones longitudinal y ancho, posteriormente en los mismos sentidos con un marco de madera aislante (de alma de lana de vidrio) de 2,5 cm de espesor para evitar las pérdidas de calor (figura 2).

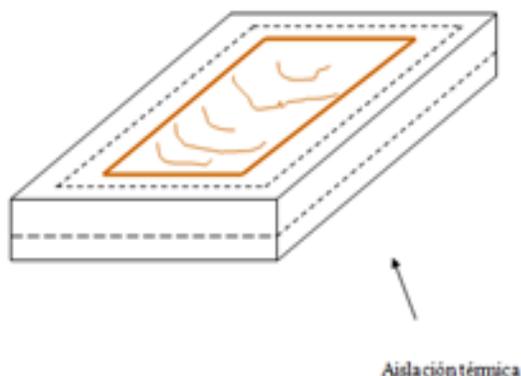


Figura 2: Con un marco de madera aislante (de alma de lana de vidrio) de 2,5 cm de espesor para evitar las pérdidas de calor.

### III.3 EQUIPAMIENTO Y DISPOSITIVOS DE MEDIDA

El material de estudio fue ubicado en el secadero túnel de la planta piloto de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, de (0,35 x 0,35 m) de sección, provisto de registro de temperatura seca y temperatura húmeda a través de termómetros de mercurio calibrados con una exactitud de 0,5°C. La velocidad del aire en la grilla se midió con anemómetro de hilo caliente portátil.

El registro de temperaturas dentro del material se efectuó mediante termocuplas de cromelalumel (tipo K), de 0,5 mm de diámetro, recubiertas con teflón, que van a un indicador digital de cinco canales M-5019K5, rango de medición 0- 999 C, precisión 0,3C, dotado de amplificadores de bajo corrimiento térmico y corrección de temperatura por junta fría, multiplexada y convertida a palabra de datos en 13 bits. El indicador se conecta a la PC para la adquisición de datos vía RS232 optoaislada.

La circulación del aire de secado, forzada, por medio de un electro ventilador con una potencia instalada de 2 CV, a 1400 rpm, de tipo centrífugo.

La calefacción del secadero se logra a través de una batería de resistencias de 15,22, 4,6 y 14 A comandadas a través de tablero central con interruptores para tal fin. Las pesadas de la muestra se efectuaron con balanza de precisión y tolerancia de  $10^{-2}$  gr.

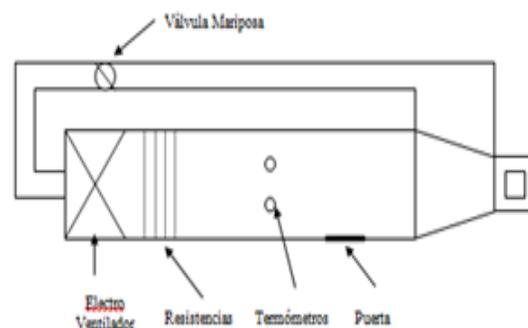


Figura 3: Vista en planta secadero.

### III.4 PROCEDIMIENTO

Una vez que las muestras fueron aisladas para reducir las pérdidas a la dirección radial y con el secadero en régimen a las temperaturas establecidas según la cédula de secado, se dispusieron las muestras en la grilla, previamente pesadas. Las primeras horas de secado se tomaron como del período preparatorio, se controlaron manualmente las temperaturas, midiéndose la humedad relativa y la velocidad del aire en la estiba.

Las mediciones de peso de las probetas se efectuaron cada media hora, sobre la probeta tomada como testigo, con las mediciones de temperatura en los nodos a lo largo del espesor (uno a 0,5 mm de la superficie y cuatro a espaciamientos iguales) y a una profundidad de 2 cm, en forma permanente (registro en PC).

Las demás probetas se emplearon para la determinación experimental de los gradientes de contenido de humedad. Para ello se retiraban del secadero y se practicaba el seccionamiento con sierra sinfín.

Las piezas se cortan en su sección central en las medidas de 100 x 100 mm y a esta se la rebana en cuatro rodajas, perpendiculares a la dirección del flujo, para calcular el contenido de humedad de cada una de ellas.

La probeta testigo se mantuvo en el secadero hasta la finalización del secado, llevándola luego a estufa a 105°C para la determinación de peso seco.

### IV. RESULTADOS

El modelo en diferencias que no toma en cuenta la termodifusión, presenta el mejor acuerdo a los resultados experimentales y en adelante las consideraciones se refieren al mismo.

Los resultados (predichos y experimentales) se presentan en las figuras 4 y 5 anexos, donde se visualiza la evolución del secado para las temperaturas de 100 °C, 110 °C y 120 °C, con temperatura húmeda de 60 °C.

En los gráficos se muestran las temperaturas de los nodos: exterior, tres interiores y el nodo central, igualmente espaciados para un espesor de la muestra de 40mm, incluyendo las obtenidas teóricamente y las medidas en términos del tiempo de secado.

Queda claramente determinada la influencia del nivel de temperatura seca sobre la velocidad de secado, a mayor temperatura mayor pérdida de humedad del material y la poca influencia de la temperatura húmeda ( evaluada a 70°C, 60 °C y 50°C ) sobre la velocidad, de allí que se exponen los resultados para el valor de 60°C.

En la simulación se ha tenido en cuenta, en vista de las limitaciones del método en diferencias explícito adoptado, en lo referido a convergencia y estabilidad, los intervalos de tiempo (30") y el espaciamiento entre nodos (5mm), a partir de las aproximaciones de primer orden para las derivadas temporales de temperatura y humedad como las de segundo orden para las derivadas espaciales de la temperatura y humedad.

De los resultados hallados, se manifiesta una pronunciada diferencia entre los valores de temperatura nodales al inicio del secado (período de calentamiento), diferencia que va disminuyendo a medida que el contenido de humedad decrece con la regresión del frente seco desde su superficie.

Hacia las etapas finales del secado, con la desaparición del agua libre, con las finas capas exteriores al nivel de contenido de equilibrio, las temperaturas de ellas se aproximan a la del medio calefactor circundante, con un perfil interior de temperaturas suavizado y un más pronunciado perfil de contenidos de humedad, anunciando la presencia de un equilibrio térmico, precedente al equilibrio másico.

Las diferencias observadas con los valores experimentales encuentran justificación en la variabilidad de las propiedades del material, dadas las características peculiares de la madera y las aproximaciones utilizadas, más las involucradas por el método numérico de resolución.

#### IV.1 VALORES Y EXPRESIONES ADOPTADAS

$$h = 40 - 45 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

$$\partial_R(x) = \rho_s(0,4 + 0,5x) + 0,24, \text{ en } \frac{w}{m^0 C}$$

$$e_p(x, T) = \frac{(0,26B + 0,011T + 0,01x)}{(1 + 0,1x)} \text{ cte de unidades en } \left( \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right)$$

$$D(X, T) = (A + BX) \exp^{\frac{c}{T+273,2}} \text{ en } \left( \frac{m^2}{s} \right), A = 3,8 \cdot 10^{-4}, B = 4 \cdot 10^{-4}, C = 3900 - 3920$$

t= 30 segundos  
z= 0,005m

$$\rho_s = 450 - 500 \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

$K_C = 2 \cdot 10^{-7}$  m /s Las propiedades del aire se obtuvieron de diagrama psicométrico Carrier (altas temperaturas).

#### V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, mediante la simulación de la operación a través de un programa en Visual Basic y adoptando la técnica de aproximar las ecuaciones diferenciales por ecuaciones algebraicas en diferencias finitas, muestran un buen ajuste con los valores extraídos de las experiencias, conformando una buena base predictiva para diferentes condiciones y medidas del material.

Los valores adoptados para las propiedades que se involucran en el modelo están en concordancia con los publicados para material maderable similar al pino elliotti. De cualquier forma, existe un margen importante para profundizar el refinamiento de tales valores que orienta hacia una mayor exactitud de los valores de las variables simuladas.

La primera etapa del secado, con la presencia de agua libre, está influido por las condiciones externas, mientras que a valores más bajos del contenido de humedad la componente difusiva del modelo ejerce un rol controlante.

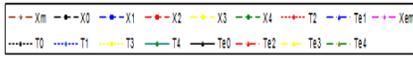
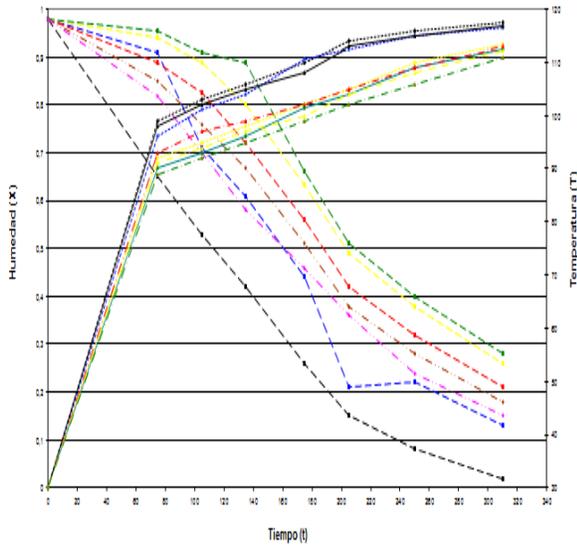
Además la consideración de la transferencia de calor y masa en sentido radial, como dirección controlante, no desvirtúa la posibilidad de poder considerar, en estudios posteriores, la contribución longitudinal y tangencial.

#### VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Basilico, C. and Moyne, C., **Moisture Transport Analysis During High Temperature Convective Drying of Wood, Drying of Solids**, Ed. Arum S. Mujundar, 317-327(1986).
- [2] Pang, S. ; **“Relative Importance of Vapour Diffusion and Convective Flow in Modelling of Softwood Drying”**, Drying technology, 18(1&2) : 271-281 (1998).
- [3] Hukka, Antti. (1997), **“Evaluation of parameter values for a high temperature drying simulation model using direct drying experiments”**, Drying Technology, 15 (3&4), pp 1213-1229.
- [4] Tarasiewicz,S., Ding,F. And Léger,F.; **“Modeling Simulation and Control of the Wood Drying Process”** , Drying Technology, 16(6):1085-1100(1998).
- [5] A. Kaya, O. Aydin, and I. Dincer, **“Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects,”** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, no. 17-18, pp. 3094–3103, 2006.
- [6] A. Kaya, O. Aydin, and I. Dincer, **“Numerical modeling of forced-convection drying of cylindrical moist objects,”** Numerical Heat Transfer Part A, vol. 51, no. 9, pp. 843–854, 2007.
- [7] A. Kaya, O. Aydin, and I. Dincer, **“Heat and mass transfer modeling of recirculating flows during air drying of moist objects for various dryer configurations,”** Numerical Heat Transfer Part A, vol. 53, no. 1, pp. 18–34, 2008.

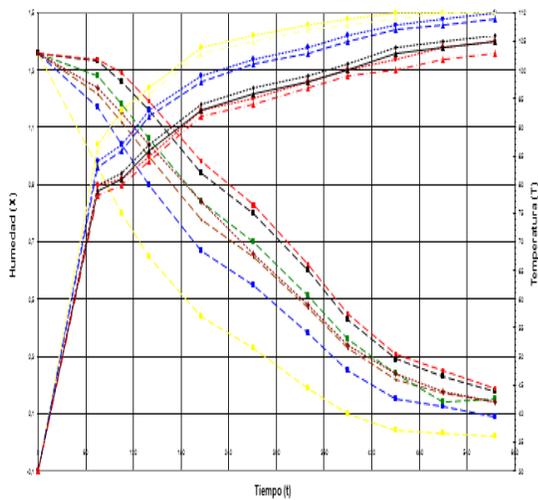
[8] Bassal, A., Vasseur, J., and Lebert, A. (1993), "Measurement of water activity above 100°C", Journal of Food Science, 58(2), pp 449-452.

VII. ANEXOS



T: Temperatura Predicha      Te: Temperatura experimental       $X_m$ : Humedad media

Figura 4. Cédula 120-60.



T: Temperatura Predicha      Te: Temperatura experimental       $X_m$ : Humedad media

Figura 5. Cédula 110-60.

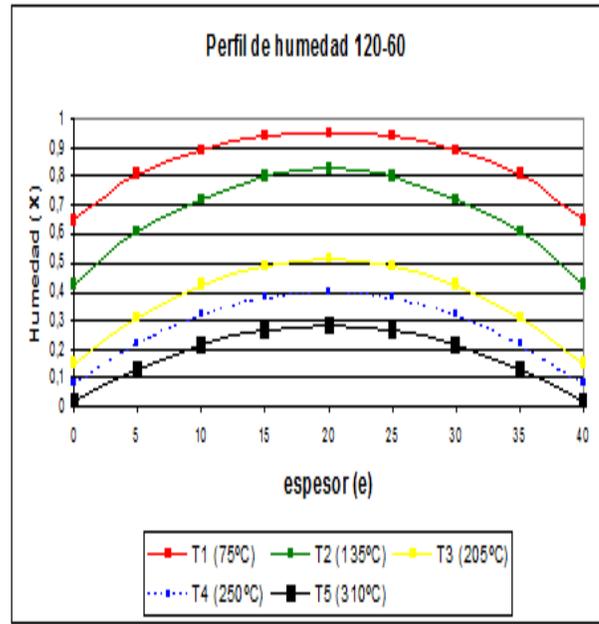


Figura 6. Perfil de humedad.

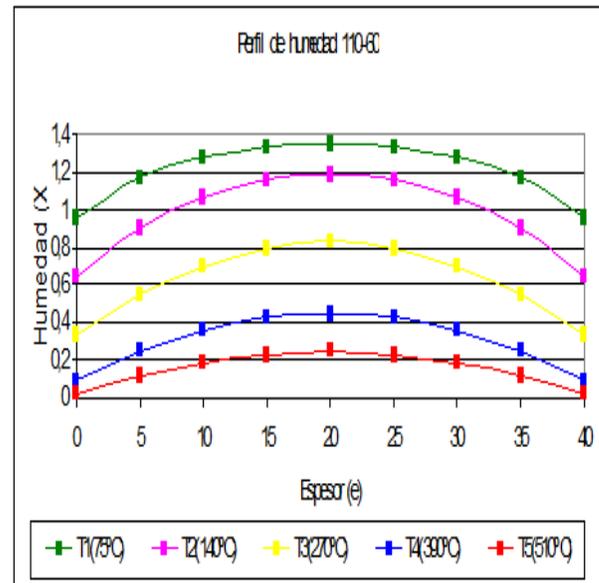


Figura 7. Perfil humedad .

Ed. 0003 VOL 001 – ISSN 2447-0228 (online)