



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



MODELADO CINÉTICO DEL SECADO DE CONTENIDO RUMINAL CON EFECTOS MULTIDIMENSIONALES

Andrés Camilo Hernández Ruiz¹, Jesús David Rhenals Julio², Arnold Rafael Martínez Guarín³

1. Estudiante del programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías – Universidad de Córdoba.
2. Docente titular del programa de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingenierías – Universidad de Córdoba. Filiación del codirector.
3. Docente titular del programa de Ingeniería mecánica, Facultad de Ingenierías – Universidad de Córdoba. Filiación del director

1. RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó un modelo cinético para el proceso de secado de contenido ruminal. A partir de ensayos de secado del contenido ruminal en un equipo TGA, se determinaron las curvas de secado a una tasa de calentamiento de 10 Kmin^{-1} , para posteriormente mediante el modelo de Coats y Redfern, que describe la evolución de la pérdida de humedad en función de la temperatura (el cual hace uso de la ecuación de Arrhenius y un modelo de desaceleración), encontrar los valores de energía de activación, orden de reacción y factor pre exponencial. Una vez obtenido el modelo cinético, se procede a acoplar dicho modelo a la teoría de transferencia de calor en estado transitorio, simulando el comportamiento tanto de la temperatura como de la pérdida de masa dentro de un paralelepípedo rectangular de contenido ruminal en un ambiente cuyas condiciones se asemejan a las de un secador solar ubicado en la ciudad de Montería. De los resultados obtenidos, se reflejó un ajuste del 98,92% de los datos de regresión lineal, y se observó que el perfil de temperaturas y humedad eran similares, lo cual implica que el modelo cinético



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



tuvo buen acople a la transferencia de calor, los resultados experimentales se predicen adecuadamente con los resultados del modelo.

PALABRAS CLAVES

Contenido ruminal, curvas de secado, ecuación de Arrhenius, modelo cinético, transferencia de calor.

2. LISTA DE SIMBOLOS

H	Porcentaje de humedad [-]	T	Temperatura termodinámica [K]	g	Aceleración de la gravedad [$m s^{-2}$]
m_i	Masa inicial del proceso de secado [kg]	n	Orden de reacción [-]	γ	Coefficiente de expansión volumétrica del aire [K^{-1}]
m_f	Masa final del proceso de secado [kg]	β	Tasa de calentamiento [$K \text{ min}^{-1}$]	T_s	Temperatura superficial del cuerpo [K]
m_T	Masa presente a la temperatura indicada [kg]	λ_{eff}	Conductividad térmica efectiva [$W m^{-2} K^{-1}$]	L_c	Longitud característica del cuerpo [m]
α	Fracción de masa extraída [-]	$(\rho c_p)_{eff}$	Capacidad térmica volumétrica efectiva [$J m^{-3} K^{-1}$]	ν	Viscosidad cinemática del aire [$m^2 s^{-1}$]
$f(\alpha)$	Función modelo dependiente de la fracción de masa [-]	λ_{agua}	Conductividad térmica del agua [$W m^{-1} K^{-1}$]	Ra_L	Número de Rayleigh [-]
$k(T)$	Velocidad de reacción [min^{-1}]	λ_{rumen}	Conductividad térmica del contenido ruminal [$W m^{-1} K^{-1}$]	Pr	Número de Prandtl [-]
A	Factor pre exponencial [min^{-1}]	h	Coefficiente convectivo [$W m^{-2} K^{-1}$]	Δt	Paso temporal [s]
E_a	Energía de activación [$J \text{ mol}^{-1}$]	T_∞	Temperatura ambiente [K]	ΔL	Paso espacial de malla [m]
R	Constante de los gases [$J \text{ mol}^{-1} K^{-1}$]	λ_{aire}	Conductividad térmica del aire [$W m^{-1} K^{-1}$]	Co	Número de Courant [-]



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



3. INTRODUCCIÓN

El contenido ruminal es una biomasa obtenida del residuo de los sacrificios en los mataderos bovinos, cuyo uso se puede extender al sector energético por medio de su combustión, para ello, dicha biomasa debe someterse a distintos procesos, siendo determinante el proceso de secado (Bracho-Espinoza, 2017). El contenido de humedad del contenido ruminal es una propiedad importante en el proceso de combustión, ya que un alto porcentaje de este, provocaría problemas en la ignición y baja temperatura de flama (Villalba Vidales & Arzola de la Peña, 2015). Por lo tanto, es esencial hacer uso de sistemas de secado, para asegurar una correcta operación de combustión y generar eficientemente la energía.

En la literatura, se puede encontrar información acerca del secado de biomasa bajo condiciones transitorias de temperatura, haciendo uso del análisis termogravimétrico (TGA), para ejemplificar esto, (Somorin et al), investigaron sobre el secado cinetico no isotermico de heces humanas, ademas de los efectos de la tasa de calentamiento y las mezclas de dichas heces con biomasa a base de madera. (Zhongqing et al), indagaron el comportamiento pirolítico y cinético de la cáscara de palma de almendra, a una tasa constante de calentamiento, donde por medio de metodos integrales, calcularon la energía de activación, describiendo así el mecanismo de secado. (Baldán et al), estudiaron el secado de diferentes residuos agrícolas, tales como la cáscara de calabaza, membrillo y orujo de uva, para ello hicieron uso de diferentes tasas de calentamiento a diferentes humedades iniciales, con la intención de modelar el secado, hicieron uso del método de Coats-Redfern y Sharp , estimando así los parámetros cinéticos de factor preexponencial y energía de activación. (Chen, Zhang, & Zhu) estudiaron la transferencia de calor y masa en el secado no isotérmico de cáscaras de arroz y tallos de algodón, dichos los experimentos se realizaron a cabo por medio de un analizador térmico TG/DSC.

El objetivo del presente artículo, busca modelar numéricamente el proceso de secado de contenido ruminal por medio de la determinación de parámetros cinéticos, como son la



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



energía de activación, el orden de reacción y el factor pre exponencial, obtenidos de las curvas de secado.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales

El contenido ruminal se obtuvo del matadero municipal en la ciudad de Montería-Colombia, Frigo Sinú S.A.S y fue secado en un equipo analizador termo gravimétrico TGA, perteneciente al laboratorio de ciencias térmicas del Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (ITM).

4.2. Parámetros de la cinética de secado

El contenido de humedad del contenido ruminal puede ser descrita mediante la ecuación (1)

$$H = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde m_f es la masa final y m_i es la masa inicial.

En este proyecto no se trabajará exclusivamente con el porcentaje de humedad, sino con la fracción de masa extraída α , la cual se describe en la ecuación (2):

$$\alpha = \frac{m_i - m_T}{m_i - m_f} \quad (2)$$

Donde m_T es la masa presente a la temperatura indicada.

4.3. Determinación de la cinética de secado

El modelo cinético no isotérmico usado es el descrito en la ecuación (3), el cual se conoce como el modelo cinético de Coats y Redfern para análisis termo-analítico de curvas (Ebrahimi-Kahrizsangi & Abbasi, 2008), se usó dicho modelo ya que es adecuado para procesos de cinética sólida que obedecen a una reacción de un solo paso:



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (3)$$

En la ecuación anterior, aparece la dependencia de la temperatura de la constante de velocidad de reacción, descrita mediante la ecuación de Arrhenius $k(T)$ y un modelo de desaceleración, el cual es una función la fracción de masa extraída $f(\alpha)$. La ecuación de Arrhenius nos ayudó a establecer una relación entre la temperatura y la velocidad de reacción, por medio de la ecuación (4):

$$k(T) = A e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (4)$$

Donde E_a, R, T y A son la energía de activación [$J mol^{-1}$], la constante de los gases [$8,314472 J mol^{-1}K^{-1}$], la temperatura [K], y el factor pre exponencial [min^{-1}]. El modelo de desaceleración de orden de reacción n , posee la característica de que tiene su máximo al inicio del proceso y disminuye a medida que aumenta la conversión en el proceso, matemáticamente se describe por la ecuación (5):

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (5)$$

Por lo que combinando las ecuaciones (4) y (5) tenemos lo siguiente:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\alpha}{dT} \frac{dT}{dt} = \beta \frac{d\alpha}{dT} = A e^{-\frac{E_a}{RT}} (1 - \alpha)^n \quad (6)$$

Donde el término $\frac{dT}{dt} = \beta$ es la tasa de calentamiento [$K min^{-1}$]. Se resolvió la ecuación (6) como una ecuación diferencial separable, dando lugar a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{T^2} \frac{d\alpha}{(1 - \alpha)^n} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E_a}{RT}} \frac{dT}{T^2} \quad (7)$$

Como se puede ver, se multiplicó a ambos lados de la ecuación por $1/T^2$, por lo que se integró a ambos lados de la ecuación, del lado izquierdo integramos desde $\alpha_i = 0$ hasta α , y del lado derecho integramos desde T_i , la cual es la temperatura del contenido ruminal al inicio



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT-891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



del experimento de secado, hasta una temperatura cualquiera T , lo cual se pudo expresar mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{T^2} \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n} = \frac{AR}{\beta E_a} \int_{T_i}^T \frac{E_a}{R} \frac{1}{T^2} e^{-\frac{E_a}{RT}} dT \quad (8)$$

Se llamó a la integral del lado izquierdo como $g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{(1-\alpha)^n}$, por lo que, al integrar del lado derecho de la ecuación, se obtuvo la siguiente expresión:

$$\frac{1}{T^2} g(\alpha) = \frac{AR}{\beta E_a} \left[e^{-\frac{E_a}{RT}} - e^{-\frac{E_a}{RT_i}} \right] \quad (9)$$

Como inicialmente se trabajó con una temperatura relativamente baja, se pudo despreciar el término $e^{-\frac{E_a}{RT_i}}$, se aplicó logaritmo neperiano a ambos lados de la igualdad, resultando en la ecuación (10):

$$\ln\left(\frac{1}{T^2} g(\alpha)\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E_a}\right) - \frac{E_a}{RT} \quad (10)$$

Se graficaron los resultados de $\ln(g(\alpha)/T^2)$ vs $1/T$, se usó el método del trapecio para resolver la integral $g(\alpha)$ en el software Excel. Lo cual proporcionó los valores de E_a , A y n del proceso de secado.

4.4. Acoplamiento de la transferencia de calor

Una vez obtenidos los parámetros cinéticos, se hizo uso de la transferencia de calor, para ello se simuló en el software FlexPde, un paralelepípedo rectangular, tal como muestra la



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

Fig. 1.

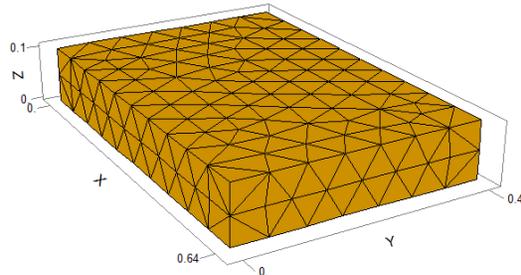


Fig. 1. Discretización del cuerpo

La ecuación diferencial que rige el perfil de temperatura en un cuerpo en función de la posición y el tiempo, es la ecuación de Biot Fourier, la cual matemáticamente se define como:

$$\lambda_{eff} \nabla^2 T = (\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

Donde λ_{eff} y $(\rho c_p)_{eff}$ son la conductividad térmica efectiva y la capacidad térmica volumétrica efectiva, cuyos valores de conductividad térmica del agua y rumen son respectivamente $\lambda_{agua} = 0,6212 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda_{rumen} = 1,10 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, la conductividad térmica del agua está determinada a la temperatura media del cuerpo y el aire, la conductividad térmica y capacidad volumétrica del rumen se extrajo de los estudios realizados por Yaghoobian, Kleissl, & Scott Krayenhoff. En el caso de la capacidad térmica volumétrica, $(\rho c_p)_{agua} = 4,145 * 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$, $(\rho c_p)_{rumen} = 2,8 * 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$.

$$\lambda_{eff} = (1 - \alpha)\lambda_{agua} + \alpha\lambda_{rumen} \quad (12)$$

$$(\rho c_p)_{eff} = (1 - \alpha)(\rho c_p)_{agua} + \alpha(\rho c_p)_{rumen} \quad (13)$$

Se trabajó con el método de diferencias finitas en el dominio espacial y temporal para resolver la ecuación (11), centradas en un nodo, teniendo en cuentas los aportes de transferencia de calor de los nodos aledaños y expresar el paso temporal de manera explícita, es decir, con la intención de predecir la temperatura en un paso posterior al que se encuentra, tal como se muestran desde las ecuaciones (25) hasta la (28).



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Las condiciones de frontera e inicial usadas en el plano frontal, plano posterior, plano lateral derecho, plano lateral izquierdo, plano superior y plano inferior, fueron las siguientes:

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T(L_x, y, z, t)}{\partial x} = h(T(L_x, y, z, t) - T_\infty) \quad (14)$$

(15)

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = h(T(0, y, z, t) - T_\infty)$$

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T(x, L_y, z, t)}{\partial y} = h(T(x, L_y, z, t) - T_\infty) \quad (16)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = h(T(x, 0, z, t) - T_\infty) \quad (17)$$

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T(x, y, L_z, t)}{\partial z} = h(T(x, y, L_z, t) - T_\infty) \quad (18)$$

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

$$T(x, y, z, 0) = 36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20)$$

Donde L_x, L_y, L_z, h y T_∞ son las dimensiones en el eje x, y, z cuyos valores son $L_x = 0,64 \text{ m}, L_y = 0,44 \text{ m}$ y $L_z = 0,10 \text{ m}$, coeficiente convectivo y temperatura ambiente respectivamente.

Se determinó por el número de Rayleigh (Çengel), tal como sigue en la ecuación (21), el coeficiente de transferencia de calor por convección en cada cara del cuerpo:

$$\text{Ra}_L = \frac{g\gamma(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \quad (21)$$

Donde $T_s, T_\infty, \nu, g, \gamma, L_c$ y Pr son la temperatura superficial del cuerpo, temperatura ambiente, viscosidad cinemática del aire, aceleración de gravedad, coeficiente de expansión volumétrica, longitud característica y número de Prandtl respectivamente. Esto para



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



determinar el tipo de flujo que tenía el aire, por lo que, considerando convección natural en cada cara, por medio del número de Nusselt (Çengel), expresado como $Nu = \frac{hL_c}{\lambda_{aire}}$, el cual para una placa horizontal y vertical son respectivamente:

$$\text{Placa horizontal ; } Nu = 0,54Ra_L^{\frac{1}{4}} ; 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 ; (\text{Régimen laminar}) \quad (22)$$

$$\text{Placa vertical; } Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 ; (\text{Para todo } Ra_L) \quad (23)$$

Se determinó el coeficiente de transferencia de calor por convección promedio, por medio de un promedio por área, las demás propiedades termodinámicas para el aire, se encontraron haciendo uso del software EES.

4.5. Estabilidad de malla

Debido a la naturaleza del uso de elementos finitos en software FlexPde para problemas de transferencia de calor en sólidos tridimensionales, se recurrió a un criterio de estabilidad para la malla a generar, dicho criterio hace uso del número de Fourier τ (Kuneš), el cual se describe en la ecuación (24):

$$\tau = \frac{\lambda_{eff} \Delta t}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L^2} \quad (24)$$

Donde ΔL y Δt son los tamaños de malla para las longitudes y tiempo respectivamente, por lo que para un tamaño de malla dado $\Delta L = 0,01 \text{ m}$, se procedió a determinar el menor intervalo de tiempo del interior del cuerpo, paredes verticales y horizontales, aristas y esquinas. Para esto, se denotó la discretización para los ejes x, y, z como i, j, k , donde estos varían de la siguiente manera, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, $k = 1, 2, \dots, l$.



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co

$$T_{i,j,k}^{p+1} = \tau(T_{i+1,j,k}^p + T_{i,j+1,k}^p + T_{i,j,k+1}^p + T_{i-1,j,k}^p + T_{i,j-1,k}^p + T_{i,j,k-1}^p) + (1 - 6\tau)T_{i,j,k}^p \quad (25)$$

$$T_{m,j,k}^{p+1} = \tau(T_{m,j-1,k}^p + T_{m,j+1,k}^p + T_{m,j,k-1}^p + T_{m,j,k+1}^p + T_{m-1,j,k}^p) + T_{\infty} \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau + \left(1 - 5\tau - \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau\right) T_{m,j,k}^p \quad (26)$$

$$T_{m,1,l}^{p+1} = \frac{\tau}{4} \left(T_{m,2,l}^p + T_{m-1,1,l}^p + T_{m,1,l-1}^p + 3T_{\infty} \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \right) + \left(1 - \frac{3}{4}\tau - \frac{3}{4} \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau\right) T_{m,1,l}^p \quad (27)$$

$$T_{m,j,l}^{p+1} = \frac{\tau}{4} \left(T_{m,j-1,l}^p + T_{m,j+1,l-1}^p + 2T_{m-1,j,l}^p + 2T_{m,j,l-1}^p + 4T_{\infty} \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \right) + \left(1 - \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau - \frac{3}{2}\tau\right) T_{m,1,l}^p \quad (28)$$

Para cada una de las ecuaciones anteriores, se determinó el número de Courant Co (Katopodes), el cual es el coeficiente positivo de la temperatura del nodo de interés, por lo que los números de Courant para cada ecuación son:

$$Co_{interior} = 1 - 6\tau \geq 0 \quad (29)$$

$$Co_{faces} = 1 - 5\tau - \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau \geq 0 \quad (30)$$

$$Co_{corner} = 1 - \frac{3}{4}\tau - \frac{3}{4} \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau \geq 0 \quad (31)$$

$$Co_{edge} = 1 - \frac{h\Delta L}{\lambda_{eff}} \tau - \frac{3}{2}\tau \geq 0 \quad (32)$$

Se determinó cada intervalo de tiempo, de la siguiente manera:

$$\Delta t \leq \frac{(\rho c_p)_{eff} \Delta L^2}{6\lambda_{eff}} \quad (33)$$



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



$$\Delta t \leq \frac{1}{5 \frac{\lambda_{eff}}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L^2} + \frac{h}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L}} \quad (34)$$

$$\Delta t \leq \frac{4}{3 \left(\frac{\lambda_{eff}}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L^2} + \frac{h}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L} \right)} \quad (35)$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{\frac{3}{2} \frac{\lambda_{eff}}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L^2} + \frac{h}{(\rho c_p)_{eff} \Delta L}} \quad (36)$$

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis del modelo cinético de secado

En esta sección, se hizo uso del software Excel para el análisis de regresión lineal, usando los datos de TGA de una muestra fresca de contenido ruminal, a una tasa de calentamiento de 10 Kmin^{-1} , se encontró que el orden de reacción, el factor pre exponencial y la energía de activación fueron de $n = 1,45933$, $A = 7,96935 * 10^{15} \text{ min}^{-1}$, $E_a = 99226,23072 \text{ Jmol}^{-1}$, cuyo coeficiente de determinación fue de $R^2 = 0,9892$, el cual es un ajuste bastante aceptable. A continuación se muestra en la Fig. 2 el gráfico de la regresión lineal.



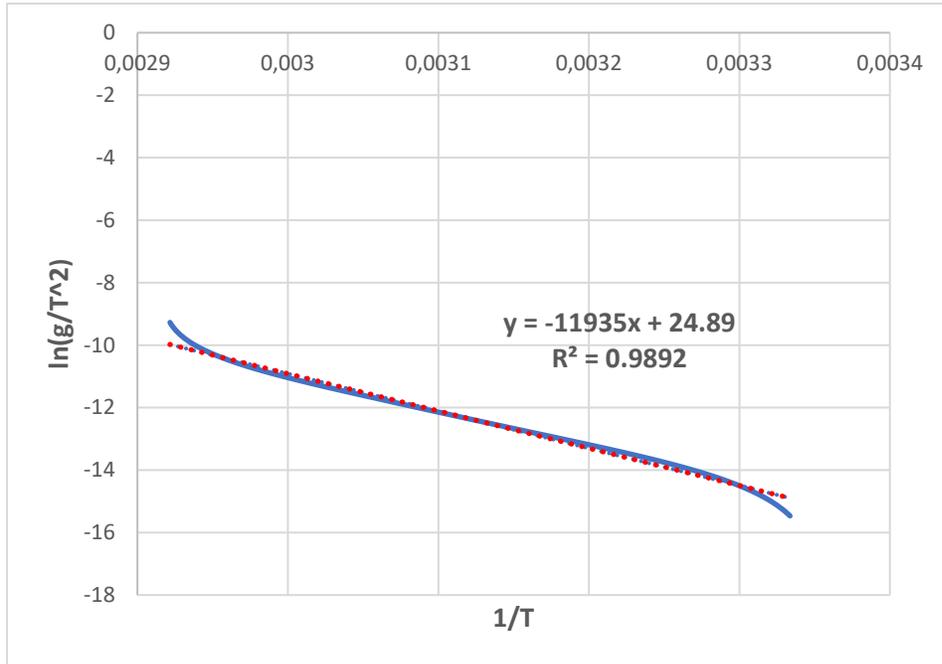


Fig. 2 Regresión lineal

Con los parámetros cinéticos definidos, se procedió a graficar el modelo en función de la masa y la temperatura, esto para comparar dichos resultados con los datos obtenidos del TGA, a continuación se presenta la ecuación que describe la pérdida de masa en función de la temperatura y la gráfica correspondiente a dicha ecuación, así como la pérdida de masa en función de la temperatura de los datos obtenidos del TGA.

$$m(T) = m_e + (m_i - m_e) \left(1 + \frac{A}{\beta} (n - 1) \int_{T_i}^T e^{-\frac{E_a}{RT}} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (37)$$

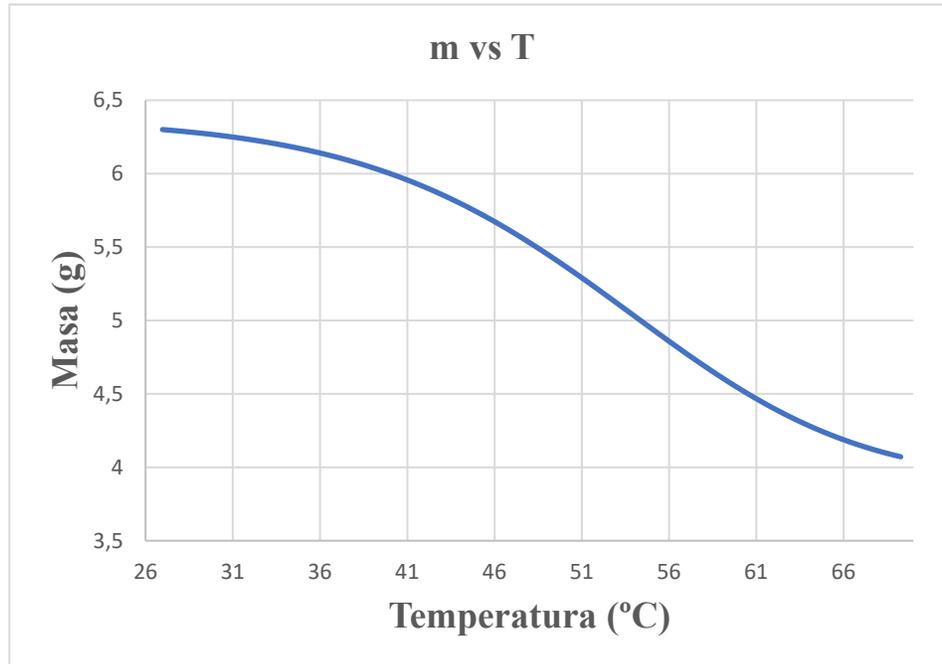


Fig. 3 Masa en función de la temperatura (modelo cinético)

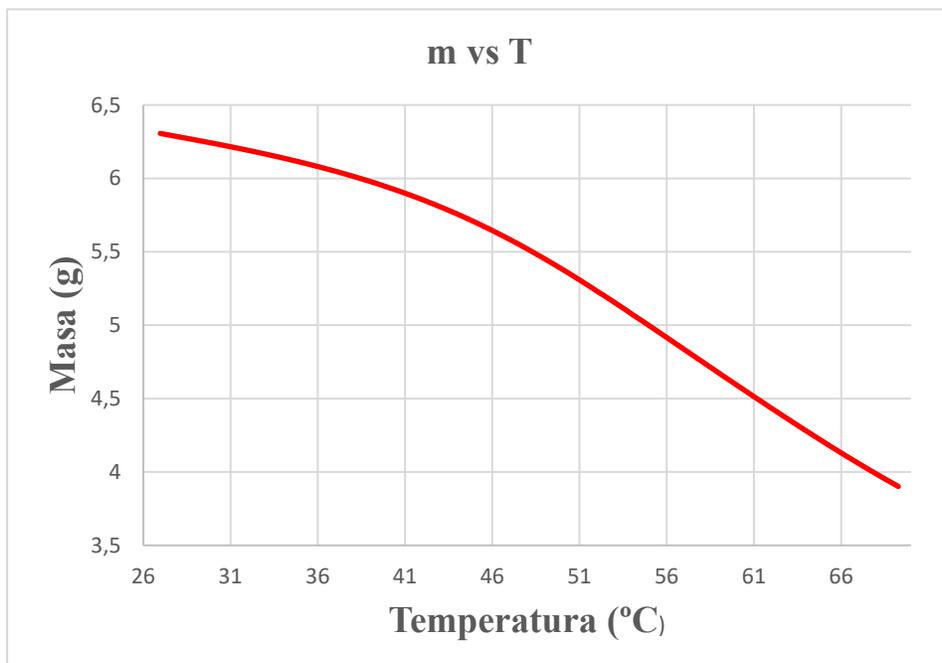


Fig. 4 Masa en función de la temperatura (Datos TGA)

Como se observa, la Fig. 3 y Fig. 4 tienen cierta similitud, por lo que se determinó la pérdida de masa del experimento TGA vs la pérdida de masa del modelo cinético, tal como muestra la Fig. 5.

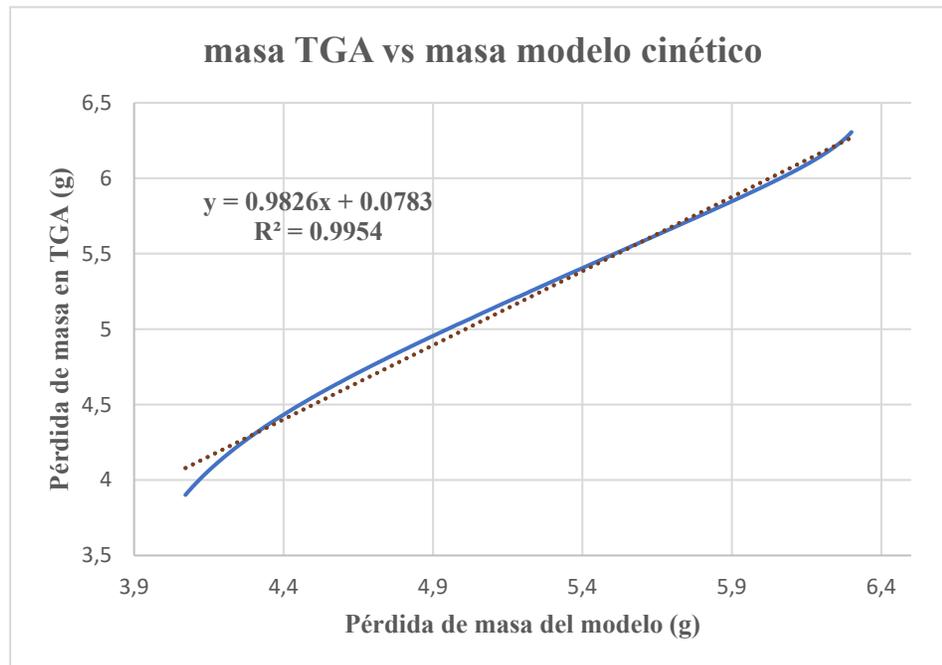


Fig. 5 Comparación entre pérdida de masa experimental vs pérdida de masa teórica

La pendiente e intercepto de esta regresión entre los datos experimentales y los datos ajustados indican que el modelo ajustado es muy bueno para predecir los valores experimentales, debido a la pendiente muy cercana a uno e intercepto cercano a cero.

5.2 Simulación computacional en FlexPde

En esta sección, una vez obtenidos los parámetros cinéticos, se resolvieron simultáneamente las ecuaciones (3) y (11), teniendo en cuenta que el menor paso temporal obtenido de las ecuaciones desde la (33) hasta la (36) fue de $\Delta t = 40$ s.

El valor del coeficiente convectivo promedio obtenido de la ecuaciones (22) y (23) fue de $h = 4,781 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Se le dió un valor inicial a la fracción de masa extraída de $\alpha = 0,1$.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

lo cual produjo el siguiente contorno de temperatura y de fracción de agua extraída según muestran la Fig. 5 y Fig. 6, a los 900 segundos y 7200 segundos:

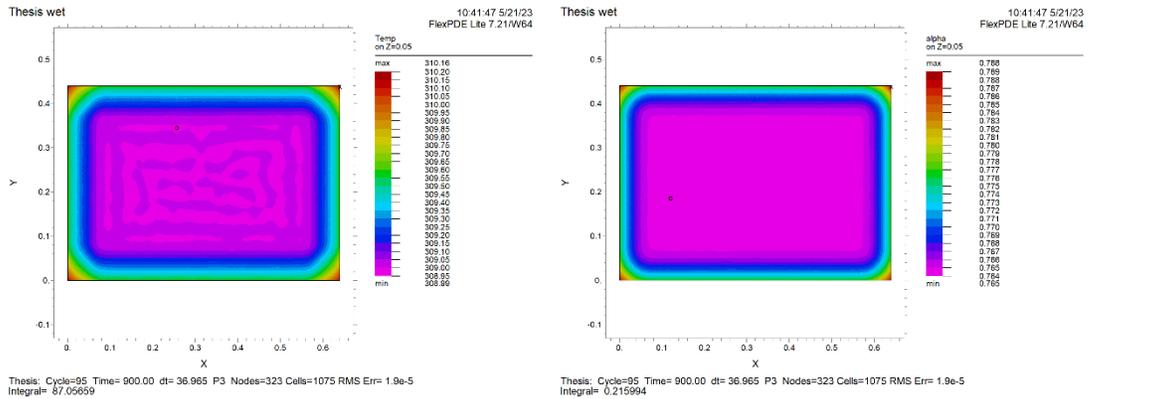


Fig. 6 Contorno de temperatura (izquierda) y contorno de fracción de agua extraída (derecha) a los 900 s.

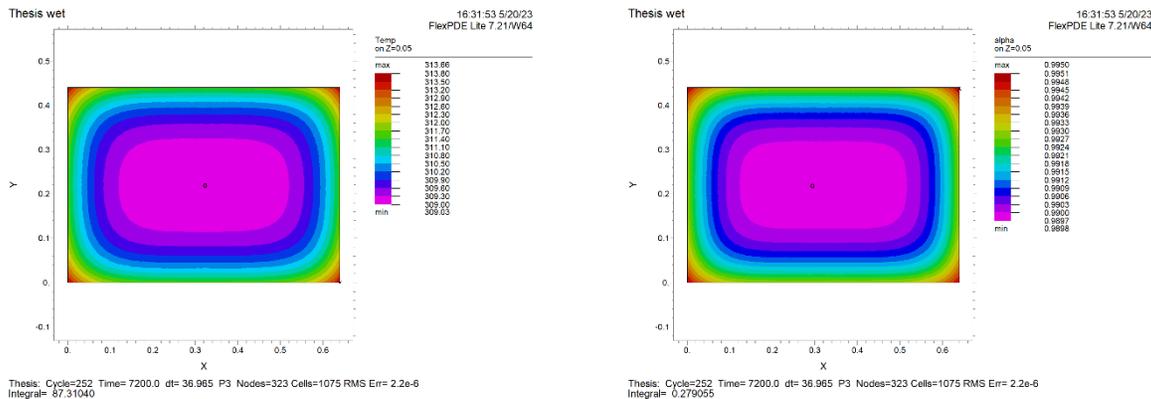


Fig. 7 Contorno de temperatura (izquierda) y contorno de fracción de agua extraída (derecha) a los 7200 s.

A continuación se muestra como varía a lo largo de una línea que se encuentra a la mitad de la altura del cuerpo, que va desde el punto medio del borde, hasta el centro del cuerpo, tal como muestra en la Fig. 7 y Fig. 8.



Certificado GP 134-1

Certificado SC 5278-1

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

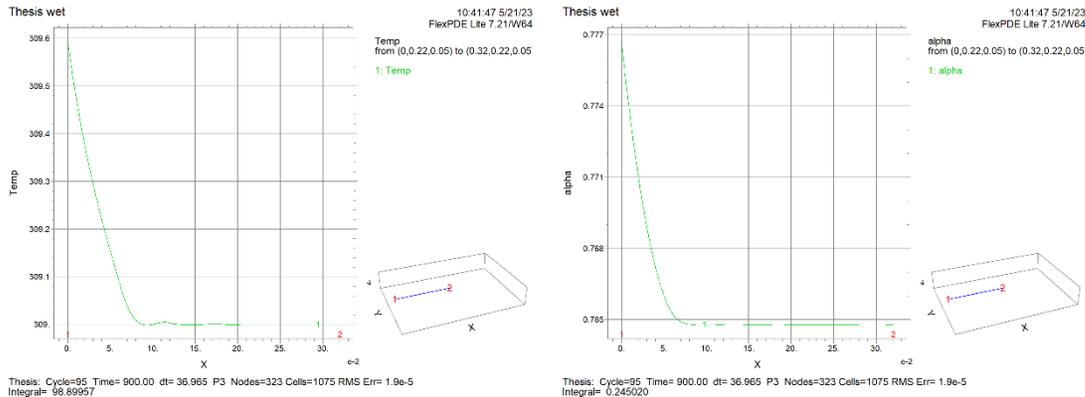


Fig. 8 Variación de temperatura (izquierda) y de la fracción extraída (derecha) a lo largo de una línea a los 900 s.

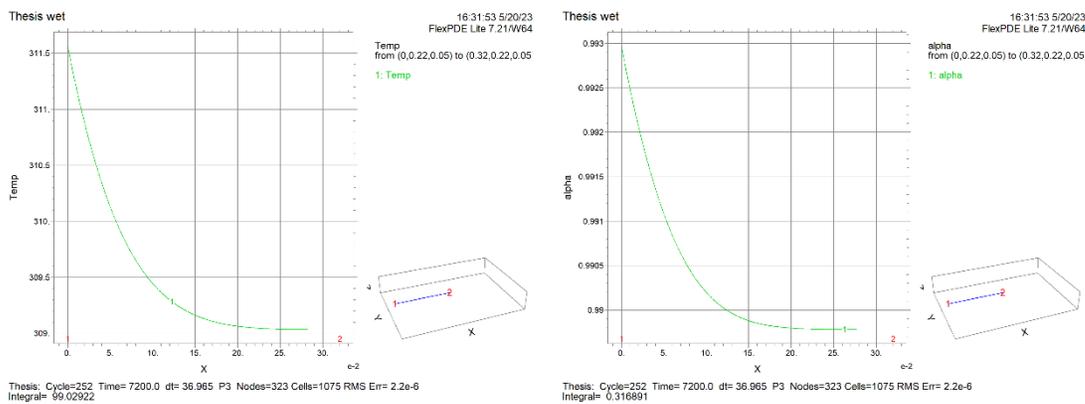


Fig. 9 Variación de temperatura (izquierda) y de la fracción extraída (derecha) a lo largo de una línea a los 7200 s.

6. CONCLUSIONES

El modelo cinético predice satisfactoriamente los datos experimentales de TGA.

El uso del modelo cinético acoplado a la transferencia de calor es aplicable a cualquier geometría definida, siempre que se tengan las propiedades termo físicas y condiciones de convección y/o radiación del ambiente.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



El modelo se podrá aplicar a cualquier tipo de biomasa, considerando que se supone un comportamiento de secado asociado a la ecuación de Arrhenius, esto para evitar el uso de la teoría de transferencia de masa.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios primeramente, por darme el conocimiento e inteligencia para desarrollarme en mi carrera. A mi familia, en especial a mi abuela que fue una madre para mí, quien me ayudó en toda mi vida a pesar del fallecimiento de su hija, tuvo la fuerza y coraje de darme amor y apoyo, a mis tíos que me acogieron como uno de sus hijos y siempre me apoyaron tanto económica como emocionalmente. A los docentes que fueron parte de mi proceso formativo, que con sus enseñanzas no hubiera sido posible llegar hasta donde me encuentro. A mis directores, que sin su guía y exigencias, mi investigación hubiera sido muy limitada. A todas las personas, familiares, amigos e ingenieros que me apoyaron en los momentos más difíciles de mi carrera, con un consejo, dinero o una palabra de aliento, sin su apoyo seguramente hubiera renunciado a mi sueño por una emoción de incomodidad fugaz.

REFERENCIAS

- Baldán, Y., Fernandez, A., Reyes Urrutia, A., Fabani, M. P., Rodriguez, R., & Mazza, G. (2020). Non-isothermal drying of bio-wastes: Kinetic analysis and determination of effective moisture diffusivity. *Journal of Environmental Management*.
- Bracho-Espinoza, H. (2017). Use of the Ruminant Content of Cattle Benefited in the Municipality Píritu, State Falcón-Venezuela, as a Food Resource . *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 207-210.
- Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*. McGraw-Hill.





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingenierías



Chen, D.-Y., Zhang, D., & Zhu, X.-F. (2011). Heat/mass transfer characteristics and nonisothermal drying kinetics at the first stage of biomass pyrolysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.

Ebrahimi-Kahrizsangi, R., & Abbasi, M. H. (2008). Evaluation of reliability of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*.

Katopodes, N. D. (s.f.). Chapter 8 - Methods for Two-Dimensional Shallow-Water Flow. En *Free-Surface Flow*.

Kuneš, J. (s.f.). Thermomechanics. En *Dimensionless Physical Quantities in Science and Engineering* (pág. 175).

Somorin, T., Fidalgo, B., Hassan, S., Sowale, A., Kolios, A., Parker, A., . . . Tyrrel, S. (2019). Non-isothermal drying kinetics of human feces. *Drying Technology*.

Villalba Vidales, J. A., & Arzola de la Peña, N. (2015). Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa. *Ingeniería y Desarrollo*.

Yaghoobian, N., Kleissl, J., & Scott Krayenhoff, E. (2009). Modeling the Thermal Effects of Artificial Turf on the Urban Environment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.

Zhongqing, M., Dengyu, C., Jie, G., Binfu, B., & Qisheng, Z. (2014). Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA–FTIR and model-free integral methods. *Energy Conversion and Management*.



Certificado GP 134-1



Certificado SC 5278-1



Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920

www.unicordoba.edu.co