

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Agrícola

Cinética de secado de la broza de café

**Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola.**

Álvaro Eduardo Sánchez Chinchilla

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2016

“Cinética de secado de la broza de café”

Trabajo Final de Graduación sometido a evaluación de la
Escuela de Ingeniería de Agrícola,
Facultad de Ingeniería,
Universidad de Costa Rica,
como requisito para optar al grado de:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Álvaro Eduardo Sánchez Chinchilla
Estudiante

Aprobado por el Tribunal Examinador:

Ing. Mauricio Bustamante Román
Presidente, Tribunal Examinador

Dr. Pedro Casanova Treto
Director, Equipo Asesor

Dr. Carlos Rojas Alvarado
Miembro, Equipo Asesor

Dra. Kattia Solís Ramírez
Miembro, Equipo Asesor

Ing. Juan Roberto Mora Chaves
Miembro, Tribunal Examinador

AGRADECIMIENTOS:

A mi padre por darme el apoyo y a la vez libertad para encontrar mi camino.

A mi madre por darme la vida y ayudarme a alcanzar la integridad de mi ser.

A mi hermano por darme razones para disfrutar de la vida, a pesar de las dificultades.

A mis amigos por estar presentes en mis momentos de flaqueza.

A Pedro Casanova y Kattia Solís, por darme su consejo y su apoyo logístico, además de la oportunidad de completar este proyecto a pesar de las complicaciones.

A Carlos Rojas por estar disponible cuando lo necesité. Sus consejos fueron muy valiosos.

A Alejandra Rojas por estar siempre apoyándome para alcanzar mis metas profesionales, escucharme y darme su consejo.

A todos los profesores de la carrera por impartirme su conocimiento y sus experiencias.

A todas las personas que han sido parte de mi vida. Aunque fugaces, sus intervenciones marcaron mi existencia hasta niveles que no soy capaz de entender.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
Resumen.....	vii
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	4
2.1. Objetivo principal	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. Marco teórico.....	5
3.1. Generalidades del café y sus residuos	5
3.2. Producción de energías renovables en el marco nacional.....	6
3.3. Estado del arte de la cinética de secado.....	8
3.4. Curvas de secado	14
3.5. Difusividad efectiva y energía de activación	15
4. Metodología.....	18
4.1. Curvas de secado experimentales.....	19
4.2. Modelos de secado.....	22
4.3. Difusividad efectiva	23
4.4. Energía de activación y factor de frecuencia	24
5. Análisis de resultados y discusión	26
5.1. Curvas de secado y velocidad de secado.....	27
5.2. Modelos de secado.....	30
5.3. Difusividad efectiva, energía de activación y factor de frecuencia	42
6. Conclusiones	50
7. Recomendaciones.....	51
8. Referencias bibliográficas.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Información sobre diez principales cultivos de Costa Rica, residuos correspondientes aprovechables para producción de energía y su poder calorífico mayor o HHV (MJ kg^{-1}).....	2
Tabla 3.3.1. Modelos de secado propuestos por diferentes autores.	15
Tabla 5.1. Contenido de humedad inicial en base húmeda (CH b.h.) para cada tratamiento.....	26
Tabla 5.2. Condiciones de temperatura ambiente en cada tratamiento.	26
Tabla 5.3. Condiciones humedad relativa ambiente durante cada experimento.....	27
Tabla 5.2.1 Valores de los coeficientes de ajuste del modelo de Page para el secado de la broza de café.	36
Tabla 5.2.2 Coeficiente de determinación ajustado de las regresiones de los coeficientes del modelo de Page para broza de café, utilizando distintas combinaciones de variables.	38
Tabla 5.2.3 Residuos, suma de cuadrados de los residuos y error estándar de la estimación del coeficiente k_2 utilizando la ecuación 6.	40
Tabla 5.2.4. Coeficientes de determinación de ajustes polinómicos de primero, segundo y tercer orden para cada tratamiento.....	41
Tabla 5.2.5 Coeficientes de regresión de ecuación de ajuste polinómico de segundo orden para cada uno de los tratamientos.	41
Tabla 5.3.1 Difusividad efectiva de cada condición de secado y la suma de cuadrados de los residuos correspondiente.....	42
Tabla 5.3.2 Difusividad efectiva de cada fase de secado, con los puntos críticos correspondientes (expresados como relación de humedad), para cada tratamiento.....	47
Tabla 5.3.3 Energía de activación y factor de frecuencia de cada fase de secado, para las dos velocidades de aire estudiadas.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.4.1. Ilustración del efecto que tiene la energía de activación en el proceso de secado. Adaptado de [53].	17
Figura 4.1. Detalles del proceso previo al experimento. a) Condición de la broza cuando se recolectó. b) Refrigeración de la broza.	18
Figura 4.1.1. Imágenes del proceso experimental. a) Horno convectivo. b) Balanza. c) Cuatro réplicas de una muestra al final del proceso de secado.	19
Figura 4.1.2. Acomodo de las bandejas dentro del horno. Dimensiones en centímetros.	21
Figura 5.1.1 Curvas de relación de humedad promedio contra tiempo para cada tratamiento.	28
Figura 5.1.2 Curvas de velocidad de secado ($\times 10^{-3} \text{min}^{-1}$) contra tiempo (s) para cada tratamiento.	29
Figura 5.2.1. Suma de cuadrados de los residuos (a) y Coeficiente de determinación ajustado (b) de los tratamientos.	31
Figura 5.2.2. Error estándar del estimado (a) y Error medio relativo (b) de los tratamientos.	32
Figura 5.2.3. Distribución de los residuos de los modelos para cada tratamiento. En el eje x se muestran los valores estimados por los modelos, mientras que en el eje y se muestran los residuos correspondientes.	35
Figura 5.2.4 Curvas de la ecuación de Page para los coeficientes mostrados en la Tabla 5.2.1.	37
Figura 5.3.1 Difusividad efectiva en función del inverso de la temperatura.	45

RESUMEN

La energía es indispensable para sostener a la sociedad actual: desde las necesidades humanas más básicas como la salud o la alimentación hasta otras como el transporte, la iluminación, o el entretenimiento. Todas estas son posibilitadas y facilitadas gracias a la disponibilidad de este valioso recurso.

El presente proyecto tiene como fin estudiar la cinética de secado de la broza de café. El secado es una etapa importante y altamente costosa del proceso de aprovechamiento de la energía contenida en los desechos vegetales. Este proceso es necesario para acondicionar el material, ya que mejora sus propiedades térmicas, mecánicas y de almacenamiento.

Se estudió la cinética de secado de la broza de café en un intervalo de temperaturas de 80 °C a 100 °C, con velocidades de aire de 0,23 m s⁻¹ y 0,38 m s⁻¹, usando un horno convectivo de aire forzado. Se obtuvieron las curvas de secado y de velocidad de secado, y se estudió como complemento la capacidad de ajuste de distintos modelos semi-empíricos, entre los cuales, el que se ajustó de mejor forma fue el de Page.

Por último, se calcularon los coeficientes de difusividad efectiva de la broza de café para las condiciones antes mencionadas y se obtuvieron las energías de activación y el factor de frecuencia de la misma, tanto para la totalidad del proceso de secado, como para cada una de sus etapas características.

1. INTRODUCCIÓN

La población de nuestro planeta ascendió a 7125 millones de personas para el año 2013, y se espera que llegue a los 8042 millones para el 2025. Para el 2011 cada persona, en promedio, fue usuaria de 1890 kg de energía (su equivalente en kg de petróleo), cifra que aumenta con el pasar de los años [1]. Al mismo tiempo, el ser humano es responsable de liberar a la atmósfera 4,9 toneladas de dióxido de carbono cada año, las cuales son responsables del continuo efecto invernadero. En el contexto nacional, Costa Rica cuenta actualmente con una población de 4,9 millones de personas, las cuales consumen 983 kg de energía por año cada una, y liberan 1,7 toneladas de dióxido de carbono al año [1].

En Costa Rica, el sector agrícola es un importante usuario de la energía, y es responsable de una importante parte de la liberación de gases de efecto invernadero. Igualmente, este sector utiliza un 36,9 % del territorio nacional para la producción de una gran diversidad de cultivos, dentro de los cuales destacan los que se observan en la Tabla 1.1. Este alto uso de la tierra para actividades agrícolas hace que el país se caracterice por ser un gran productor de residuos biomásicos, los cuales a su vez tienen un gran potencial para producir energías renovables (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Información sobre diez principales cultivos de Costa Rica, residuos correspondientes aprovechables para producción de energía y su poder calorífico superior o HHV (MJ kg^{-1})

Cultivo	Producción MT [2]	HHV MJ/kg	Fuente	Residuo correspondiente	Proporción de residuos biomásicos %	Fuente
Caña de azúcar	4 005 752	17,33	[3]	Bagazo	30	[4]
Piña	2 484 729	18,47	[3]	Rastrojo y corona	5	[4][5]
Banano	2 136 437	-		Pinzote y Rechazo	15	[4][5]
Naranja	280 000	18,35	[6]	Cáscara y semillas	-	-
Palma aceitera	255 588	19,61		Fibra	42	[4]
Fruta fresca	240 000	-		-	-	-
Arroz	214 308	16,14 / 15,32	[3]	Cascarilla / Paja	26,7 y 175,7 *	[5]
Yuca	147 375	-		-	-	-
Melón	132 017	13,5	[7]	-	-	-
Café	125 086	18,34	[8]	Cascarilla	45,5	[4]

* Con base en la cosecha y no en la biomasa total como los demás.

En el mundo, los países de mayor ingreso se caracterizan por poseer consumos de energía más elevados [1,9]. Costa Rica es un país en vías de desarrollo, que ha tenido una tasa de crecimiento en el uso de energía de 894 *kg* por persona por año (en todas las fuentes de energía, equivalentes a la cantidad de petróleo correspondiente) en los últimos diez años [10,11].

Costa Rica tiene un alto potencial de generación eléctrica a partir de biomasa, como destaca Jiménez [12], y esto es relevante en el contexto de seguridad energética. Sin embargo, hay limitaciones técnicas como la humedad de los residuos por utilizar -la cual perjudica la operatividad de las plantas [13,14] -, que

son necesarios de estudiar, antes de desarrollar estrategias integradas de generación eléctrica a partir de estos.

Lo antes expuesto evidencia la necesidad de hacer un estudio exhaustivo del secado de los residuos húmedos con potencial de producción de energía. Los tiempos y velocidades de este proceso -o lo que llamamos la cinética de secado- ayudaría a caracterizar mejor los procesos a los cuales se ven sujetos los materiales. Los modelos de secado permiten analizar distintos escenarios de operación, con el fin de optimizar el balance final de las operaciones, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

La cantidad de residuo en forma de broza húmeda de café generada es alta y es necesario encontrar alternativas para su revalorización. El presente proyecto tiene como fin caracterizar el comportamiento de esta biomasa durante el proceso de secado. Ampliar el conocimiento en este tema particular permitiría analizar cuantitativamente distintas formas de aprovechamiento de la energía interna, para las cuales se necesite secar el material previamente, lo cual es necesario para estudiar la viabilidad financiera de cada alternativa.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Analizar la cinética de secado de la broza de café en capa fina para distintas condiciones de temperatura y velocidad de aire, con el fin de generar información necesaria para evaluar la viabilidad de su uso en distintas alternativas de aprovechamiento de su potencial energético, para las cuales sea necesario el secado como parte de su acondicionamiento previo.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- a. Obtener las curvas de secado y velocidad de secado de la broza de café a diferentes temperaturas y velocidades de aire.
- b. Evaluar los datos experimentales para determinar cuál modelo matemático de secado los representa mejor.
- c. Calcular los coeficientes de difusividad efectiva de la broza de café.
- d. Obtener el factor de frecuencia y la energía de activación del proceso de secado de la broza de café.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. GENERALIDADES DEL CAFÉ Y SUS RESIDUOS

El café (*Coffea arabica*) es un arbusto de la familia Rubiaceae. Sus semillas son utilizadas para la producción de la bebida del café. El proceso de extracción y acondicionamiento del grano de café es conocido como beneficiado.

La broza de café es un subproducto derivado del beneficiado húmedo del fruto del café (Figura 3.1.1). Corresponde al epicarpio del fruto y es derivado del proceso de extracción mecánica de la semilla (chancado). La broza corresponde al 29 % del peso total de la fruta inicial, o lo que es lo mismo, 108,6 kg por cada fanega procesada [15].

- a. Semilla
- b. Espermoderma (película plateada)
- c. Endocarpio (pergamino)
- d. Capa de pectina
- e. Mesocarpio (pulpa)
- f. Exocarpio (cáscara)
- g. Broza de café

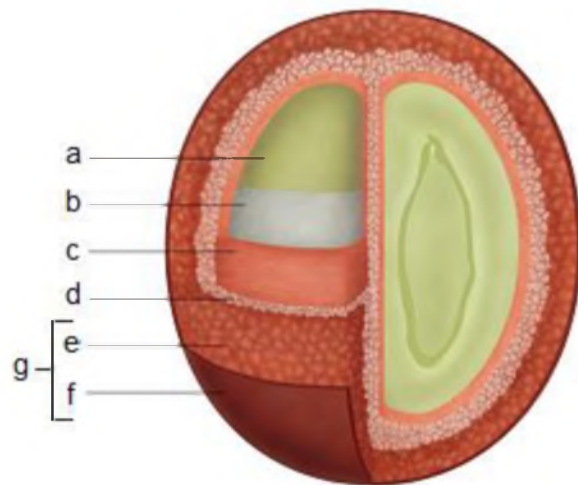


Figura 3.1.1 Diagrama del fruto del café.

El beneficiado del café es una actividad económica importante para el país. Actualmente, según el ICAFE [16] existen registradas 239 firmas beneficiadoras en el país, dispersas en siete regiones cafetaleras, a saber: Coto Brus, Los Santos, Pérez Zeledón, Turrialba, Valle Central, Valle Occidental y Zona Norte. La cosecha de café se da entre los meses de setiembre y marzo, con un pico alrededor de diciembre. Durante el año 2016 se cosecharon en el país un total de 2,2 millones de fanegas de café, equivalentes a 242 000 toneladas de broza [16].

3.2. PRODUCCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MARCO NACIONAL

Loría [17] hace un estudio exhaustivo de los aspectos relevantes de la producción de energía a nivel nacional. Destaca la importancia de tomar en consideración el ámbito social en la discusión a nivel país. Las fuentes de energía renovables tiene el potencial de generar recursos a nivel local e incentivar la creación de nuevos empleos, especialmente en el sector agropecuario y en las zonas rurales. A esto debe de agregársele la posibilidad de generar encadenamiento productivo a procesos de tratamiento de los residuos como la pelletización.

La Dirección Sectorial de Energía de Costa Rica, en el VI plan de energía 2012-2030 [18] resalta que entre 1980 y 2010 Costa Rica elevó su consumo de electricidad en 4,2 veces, al tiempo que el consumo de derivados del petróleo aumentó en 2,9 veces, lo que evidencia una alta dependencia de fuentes no renovables.

El Instituto Costarricense de Electricidad reporta en su plan de expansión que existe un potencial de $7,953 \times 10^3$ toneladas métricas de residuo vegetal identificado en el país, pero de este solo se está utilizando apenas un 13 % [19]. Actualmente, de todo el residuo biomásico producido, al 2010 se estaba generando 66,5 GWh de electricidad por año [17]. Si bien el residuo también es utilizado para combustión directa para demanda energética local, parte de la demanda de suministro eléctrico podría suplirse a partir de la explotación de estos recursos.

Según el V plan de energía 2008-2021, el potencial explotable de energía a partir de residuos agrícolas es de al menos 300 MW en forma eléctrica [19]. La diferencia entre el potencial y lo aprovechado se debe a posibles rentabilidades negativas asociados a su extracción y explotación [17].

Montero [20] realiza una investigación sobre la producción de pellets a partir de residuos de café y piña de Costa Rica. En el estudio se determinó que el poder calorífico de los pellets está por encima de los $17\,000 \text{ kJ kg}^{-1}$. Para la producción de estos densificados es necesario realizar un proceso de secado previo para llevar la biomasa a un contenido de humedad óptimo para que las propiedades mecánicas sean adecuadas. Esta etapa de remoción de humedad demanda gran cantidad de energía, por lo que Montero [20] recomienda realizar un balance de energía de la producción de los pellets.

3.3. ESTADO DEL ARTE DE LA CINÉTICA DE SECADO

La cinética de secado ha sido un tema de estudio recurrente en épocas recientes. Destacan los proyectos realizados para determinar el ajuste de distintos modelos como los de Page, Henderson y Pabis, Dos Términos, Thompson, Midilli, entre otros [21–25]. También es importante el estudio del ajuste de distintos materiales, formas de corte y condiciones de secado a las soluciones de la segunda ecuación de Fick para placas, cilindros y esferas y la obtención de energías de activación y los factores de frecuencia de distintos materiales [21–24,26–29].

El estudio de la cinética de secado de la broza de café ha sido escaso. Por el alto contenido de humedad de esta, su comportamiento durante el secado podría contrastar con respecto al de los granos. La recopilación de información mostrada a continuación se enfocó en su mayoría en los aportes hechos sobre productos agrícolas frescos.

Kafler, Comério, Dal-Bó, Lira y Arrieche [30] estudiaron la cinética de secado de la broza de café en capa fina para un rango de temperaturas de 50 °C a 80 °C y velocidades de viento de 0,5 m s⁻¹ a 2,5 m s⁻¹. Además, analizaron el ajuste a los modelos de Lewis, Brooker, Henderson, Page y Overhults, usando el coeficiente de determinación, el vicio de Box y las curvaturas de Bates y Watts. A partir de este experimento los autores determinaron que el modelo de mejor ajuste fue el Overhults, seguido por el de Page.

Akanbi, Adeyemi y Ojo [26] estudiaron la cinética de secado de tomates en el rango de temperaturas de 45 °C a 75 °C a una velocidad de aire de 0,13 m s⁻¹. Los valores de difusividad efectiva obtenidos por los autores fueron de $3,72 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $12,27 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Además, estos coeficientes se determinaron para las tres fases de secado del tomate, diferenciadas entre sí por el cambio de gradiente de las curvas de velocidad de secado, correspondientes a los puntos críticos de contenido de humedad: la primera fase se definió aproximadamente entre los primeros 60 min del secado, la segunda entre los 30 min y los 150 min, y la tercera desde los 100 min hasta acabar el procedimiento.

Doymaz [27] realizó un estudio similar al discutido anteriormente: el intervalo de temperaturas fue de 55 °C a 70 °C a una velocidad de aire de 1,5 m s⁻¹. Se obtuvieron valores de difusividad efectiva de entre $5,65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $7,53 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la muestra tratada con una solución de alcalino etil oleato y de $3,91 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $6,65 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para la muestra sin tratar. Se puede observar que existen diferencias importantes respecto a los valores reportados por Akanbi et al [26], las cuales podrían deberse a las diferencias en las condiciones de secado entre ambos estudios. Los valores de energía de activación para este caso fueron de 17,40 kJ mol⁻¹ y 32,94 kJ mol⁻¹ para la muestra tratada y el control, respectivamente.

Doymaz [21] estudió el secado del fruto de la okra. El rango de temperaturas que utilizó fue de entre 50 °C y 70 °C, con una velocidad de aire de 1 m s⁻¹. Para estas condiciones el autor obtuvo coeficientes de difusividad efectiva de entre $4,27 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $1,3 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, con una energía de activación de 51,26 kJ mol⁻¹. Para este experimento se evaluó el ajuste de varios modelos de secado. Tanto para el caso del modelo de Page como el de Henderson y Pabis se obtuvieron coeficientes de determinación mayores a 0,99.

Ertekin y Yaldiz [22] realizaron un estudio en el cual secó berenjenas en capa fina a temperaturas de entre 30 °C y 70 °C a velocidades de aire de entre 0,5 m s⁻¹ y 2 m s⁻¹. El objetivo del mismo era determinar el efecto que tenían las condiciones de secado, así como las del material, en el ajuste que podrían tener distintos modelos de secado empíricos y semi-empíricos usando regresiones no lineales comparando los modelos usando el error cuadrático medio, el chi-cuadrado y la eficiencia de modelación. Los autores determinaron que el modelo que mejor se ajustó al comportamiento de la berenjena fue el de Midilli, con RMSE menores a 0,017.

Doymaz [23] estudió la cinética de secado de las zanahorias. Para esto uso un intervalo de temperatura de 50 °C - 70 °C y una velocidad de aire de secado de 1 m s⁻¹. El autor determinó el grado de ajuste que tenían los modelos de secado de Page y el de Henderson y Pabis, respecto a los datos experimentales de la

zanahoria. De estos, el modelo de Page obtuvo un mejor ajuste que el de Henderson y Pabis, con coeficientes de determinación de entre 0,985 y 0,995. También determinó que los coeficientes de difusión efectiva de la zanahoria para estas condiciones se encontraban en el rango de $1,304 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $9,335 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, con una energía de activación de $28,36 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Kaya, Aydın y Demirtaş [28] estudiaron el secado de la zanahoria a bajas temperaturas: $35 \text{ }^\circ\text{C}$ a $55 \text{ }^\circ\text{C}$, con velocidades de aire de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ a $0,6 \text{ m s}^{-1}$, y humedades relativas de 40 % a 70 %. En este caso, los autores obtuvieron coeficientes de difusividad de entre $1,257 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $2,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Estos valores son altos, en comparación con los obtenidos por Doymaz [23], pero las diferencias se podría atribuir a las particularidades en las condiciones de secado de cada experimento. Srikiatden y Roberts [31] reportaron resultados similares a los obtenidos por Doymaz [23], usando un intervalo de temperaturas similar, aunque con velocidades de aire mayores.

Zielinska y Markowski [24], por otro lado, secaron zanahorias en un secador de lecho fluidizado. Las temperaturas que utilizaron en el experimento se encontraban en el rango de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$. La velocidad del aire que se tuvo en el secador fue de 40 m s^{-1} . Se evaluó el ajuste a distintos modelos de secado, y se obtuvo que los modelos de Page y de Dos Términos fueron los que se ajustaron mejor, con coeficientes de determinación de 0,971 y 0,99 respectivamente. Por

otro lado, los modelos de Lewis, y Henderson y Pabis no se ajustaron adecuadamente. También se obtuvieron difusividades efectivas de entre $2,04 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $2,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Babalís [29] estudió el efecto que tienen la temperatura y la velocidad del aire en el comportamiento, tanto de los coeficientes de difusividad como de las energías de activación de los higos durante su deshidratación. El autor usó temperaturas de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ a $85 \text{ }^\circ\text{C}$ y velocidades de aire de entre $0,5 \text{ m s}^{-1}$ y 3 m s^{-1} . Se obtuvo una importante variabilidad tanto en las difusividades como en las energías de activación para distintas velocidades de aire. No obstante, no se mostró una tendencia lineal entre las velocidades de aire y la energía de activación, sino que más bien se obtuvieron energías de activación de entre $30,81 \text{ kJ mol}^{-1}$ y $48,47 \text{ kJ mol}^{-1}$, con el valor mínimo a $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Además, Babalís [25] determinó que los modelos que se ajustan mejor al comportamiento del higo durante el secado son los de Weibull, Dos Términos y Thompson, en distintas condiciones cada uno.

Otros estudios han determinado el ajuste a distintos modelos de secado. Algunos de ellos han determinado modelos empíricos para describir el comportamiento de los coeficientes a través de distintas metodologías. Akpınar [32] determinó que el modelo de Midilli se ajustaba mejor al comportamiento del ayote, la papa, lonjas de manzana, entre otros; para el rango de temperaturas de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ y de

velocidades de aire de 1 m s^{-1} a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ y generó ecuaciones para describir el comportamiento de los coeficientes del modelo en función de la temperatura, la velocidad del viento, las dimensiones, entre otros. Hossain y Bala [33] determinaron los ajustes de los coeficientes del modelo de Page para chiles verdes usando temperatura, velocidad de aire y humedad relativa. Yaldiz y Erketin [34] determinaron ecuaciones de dependencia de la velocidad de viento de los coeficientes del modelo de page para el secado de frijoles verdes. Sawhney, Pangavhane y Sarsavadia [35] utilizaron la velocidad del aire y la temperatura para modelar el comportamiento de la k_1 de Page y mantuvieron el valor de k_2 constante. Erketin y Yaldiz [22] ajustaron el secado de la berenjena al modelo de Midilli y determinaron que se podía relacionar a y k_2 con la velocidad de aire, y k_1 con la temperatura. El valor de b se mantuvo constante. Erenturk y Erenturk [36] evaluaron el ajuste del modelo de Page para el secado de zanahoria y propusieron ecuaciones que utilizaban todas las propiedades del aire y las dimensiones del material para calcular los coeficientes de la ecuación de Page. Akpinar, Sarsilmaz y Yildiz [37] determinaron ajustes para los coeficientes del modelo de Midilli usando la temperatura y la velocidad del aire para modelar el secado de albaricoque. Menges y Erketin [38] secaron manzanas Golden y ajustaron los coeficientes de Midilli a la temperatura y la velocidad, con excepción del parámetro b , el cual mantuvieron constante.

3.4. CURVAS DE SECADO

Las curvas de secado son representaciones gráficas de cómo cambia la relación de humedad a través del tiempo, cuando el material es sometido a un procedimiento de secado. Diversos autores han propuesto distintas ecuaciones de secado para modelar la conducta de la razón de humedad de forma empírica o con base en simplificaciones a la segunda ley de Fick (1). Algunos de estos modelos pueden ser revisados en la Tabla 3.3.1.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (1)$$

donde:

ϕ : concentración volumétrica de cantidad de sustancia (mol m^{-3})

t: tiempo (s)

D: coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

x: posición (m)

Tabla 3.3.1. Modelos de secado propuestos por diferentes autores.

Nombre	Modelo	Referencia
Lewis	$MR = e^{-k_1 t}$	[39]
Page	$MR = e^{-k_1 t^{k_2}}$	[40]
Henderson y Pabis	$MR = ae^{-k_1 t}$	[41]
Logarítmico	$MR = ae^{-k_1 t} + b$	[42]
Dos términos	$MR = ae^{-k_1 t} + b e^{-k_2 t}$	[43]
Dos términos exponencial	$MR = ae^{-k_1 t} + (1 - a) e^{-k_2 t}$	[44]
Difusión	$MR = ae^{-k_1 t} + (1 - a) e^{-k_1 k_2 t}$	[45]
Henderson y Pabis modificado	$MR = ae^{-k_1 t} + be^{-k_2 t} + c e^{-k_3 t}$	[46]
Thompson	$t = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$	[47]
Midilli	$MR = ae^{-k_1 t^{k_2}} + b t$	[48]

Los parámetros a , b , c , k_1 , k_2 , k_3 son coeficientes de los modelos.

3.5. DIFUSIVIDAD EFECTIVA Y ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

La difusión, según Crank [49], es el mecanismo mediante el cual las moléculas se mueven en un medio por efecto de los movimientos aleatorios de las mismas. Las partículas se mueven en la dirección hacia donde exista una concentración menor de las mismas en el medio. La difusividad es un parámetro que determina la velocidad a la que se movilizan las partículas en un medio determinado, y depende de la densidad, presión, temperatura y en algunos casos del contenido de humedad [50].

El proceso de secado tiene la particularidad de que el movimiento de las partículas de agua no es solamente determinado por efectos de difusión pura: A este hay que sumarle la difusión superficial, la difusión de Knudsen, el flujo capilar, los cambios de fase, la termo-difusión, los cambios de tamaño, la heterogeneidad de

los componentes del material, entre otros. Por esto, al dificultarse obtener directamente el valor de la difusividad actual, se trabaja con un concepto de difusividad efectiva (D_{eff}) que toma en consideración todos estos mecanismos de transporte [51,52]

La difusividad efectiva es un parámetro que caracteriza el movimiento del agua dentro de un material higroscópico; este varía para un mismo material debido a las condiciones del contorno, como la temperatura, la velocidad del aire o la humedad relativa [53]. La solución a la segunda ley de Fick (1) permitiría determinar este parámetro para diferentes condiciones de secado.

Según Shi [54], como la difusión es un proceso dependiente de la temperatura, la tasa de difusión puede ser modelada mediante la ecuación de Arrhenius (2), la cual se muestra a continuación:

$$D(T) = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

donde:

$D(T)$: coeficiente de difusión como función de la temperatura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

A : factor de frecuencia ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

E_a : energía de activación (J mol^{-1})

R : constante universal de los gases ($8,3143 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$).

La energía de activación determina la cantidad de energía interna que debe tener una partícula para reaccionar -para este estudio, la reacción es un cambio de estado-. Como se puede observar en la Figura 3.4.1, si aumenta la cantidad de energía de los productos de la reacción, la tasa de la reacción aumenta hasta que se encuentra un nuevo equilibrio [55].

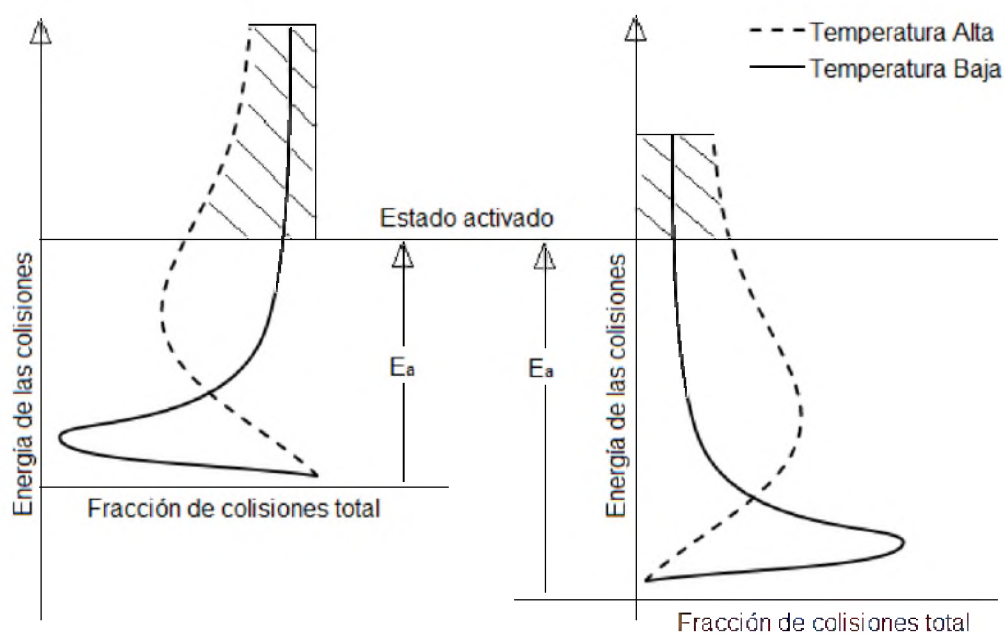


Figura 3.4.1. Ilustración del efecto que tiene la energía de activación en el proceso de secado. Adaptado de [55].

4. METODOLOGÍA

El material utilizado consistió en broza de café de la especie *Coffea arabica*, obtenida en época de cosecha, durante el mes de octubre del año 2016. Esta fue donada por el beneficio de CoopeLibertad R.L. localizado en el cantón de Moravia, en San José, Costa Rica; el cual obtiene el fruto de la región cafetalera del valle central, específicamente de la provincia de Heredia.



Figura 4.1. Detalles del proceso previo al experimento. a) Condición de la broza cuando se recolectó. b) Refrigeración de la broza.

La broza de café recolectada fue llevada a la sede Rodrigo Facio de la Universidad de Costa Rica. El material había sido chancado el mismo día en la madrugada, y fue recolectado a las nueve de la mañana (Figura 4.1a). Al llegar al laboratorio, se le realizó una prueba de contenido de humedad, a partir de la cual se determinó que este era de 89,3 % en base húmeda (CH_{bh}).

El material fue almacenado en paquetes de 300 g, en bolsas de polietileno, en un refrigerador hasta el día de su utilización (Figura 4.1b). Cada muestra fue analizada el día de su uso para determinar su contenido de humedad.

4.1. CURVAS DE SECADO EXPERIMENTALES

El secado se realizó en un horno convectivo marca Precision Scientific, modelo 625-B (Figura 4.1.1a). El diseño del experimento fue factorial con cuatro réplicas por muestra. Las variables fueron: temperatura del aire (tres niveles: 100 °C, 90 °C y 80 °C) y velocidad del aire (dos niveles: 0,38 m s⁻¹ y 0,23 m s⁻¹).

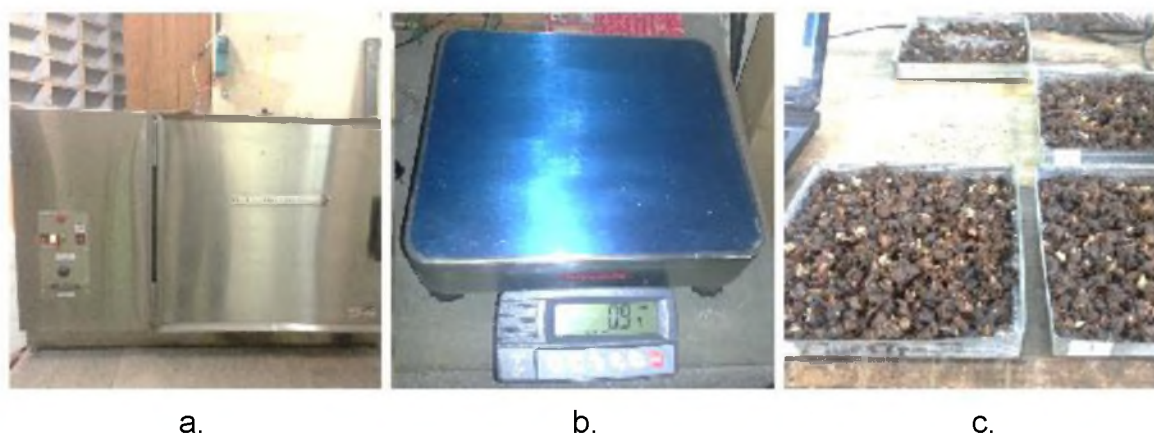


Figura 4.1.1. Imágenes del proceso experimental. a) Horno convectivo. b) Balanza. c) Cuatro réplicas de una muestra al final del proceso de secado.

Las curvas se hicieron con base en el supuesto de que las variables se mantuvieron constantes a lo largo del ensayo [56]. No obstante, las condiciones atmosféricas son difíciles de controlar. Por esta razón, se realizaron mediciones de

temperatura y humedad relativa atmosférica a lo largo de todos los ensayos. Para medir estas condiciones se utilizó un termo-higrómetro EXTECH L743076.

El procedimiento para encontrar el contenido de humedad se realizó siguiendo la norma *ASTM D4442-15*: Se colocaron tres muestras de 5 g de material en recipientes de aluminio, los cuales fueron luego introducidos al horno a 103 ± 2 °C por 24 horas. Luego, se extrajeron las muestras y se pesaron. La diferencia entre la masa inicial y final corresponde a la pérdida de humedad del material; la masa final es la masa seca. El contenido de humedad (base húmeda) se calculó como:

$$CH_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_0} = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (3)$$

donde:

CH_{bh} : contenido de humedad en base húmeda (%)

m_{seca} : masa seca ($g_{masa\ seca}$)

m_{H_2O} : masa húmeda (g_{H_2O})

m_0 : masa inicial (g)

Δm : masa de agua perdida durante el secado (g_{H_2O}).

Conociendo el contenido de humedad inicial de cada muestra, se trazaron las curvas de secado experimentales. Para ello, se utilizó una balanza TSCALE modelo PRW con una incertidumbre de 0,05 g (Figura 4.1.1b). Las masas se registraron cada 5 min durante la etapa de calentamiento del material; luego cada 15 min durante la fase de secado a velocidad constante y cada 30 min hasta que

las variaciones fueran menores a 1 g. Los ensayos se finalizaron al día siguiente en la mañana para registrar la masa correspondiente al contenido de humedad de equilibrio (Figura 4.1.1c).

Se realizaron cuatro réplicas simultáneas de cada muestra, conteniendo cada una aproximadamente 300 g de material húmedo. Cada réplica fue colocada en bandejas de 20 cm × 20 cm, las cuales tenían un fondo mallado. De igual forma, estas fueron ubicadas dentro del horno, como se muestra en la Figura 4.1.2.

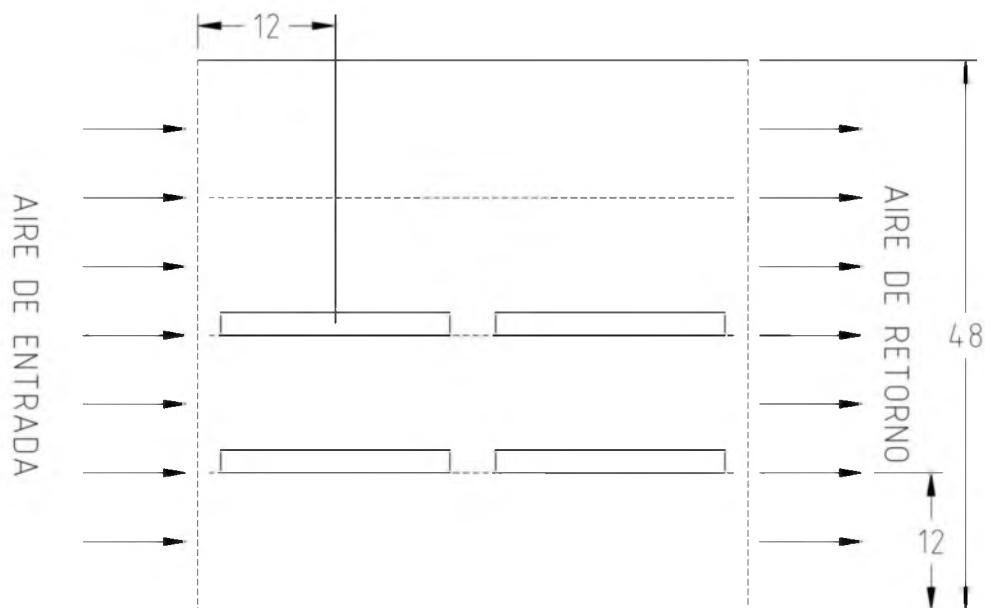


Figura 4.1.2. Acomodo de las bandejas dentro del horno. Dimensiones en centímetros.

Los datos de relación de humedad (MR) fueron calculados (4) y promediados para cada medición. Las curvas de velocidad de secado se calcularon como la

pendiente de la curva de secado en cada punto obtenido, y los puntos críticos se definieron donde se generó un cambio notable de pendiente.

$$MR = \frac{CH_{bh}(t=0) - CH_{bh}(t)}{CH_{bh}(t=0) - CH_{bh}(t=\infty)} \quad (4)$$

donde:

MR: relación de humedad (adim)

$CH_{bh}(t=0)$: contenido de humedad inicial ($g_{H_2O}/g_{masa\ seca}$)

$CH_{bh}(t)$: contenido de humedad en el instante t ($g_{H_2O}/g_{masa\ seca}$)

$CH_{bh}(t=\infty)$: contenido de humedad en el equilibrio ($g_{H_2O}/g_{masa\ seca}$)

4.2. MODELOS DE SECADO

Los datos obtenidos de los experimentos de secado fueron comparados con los modelos propuestos por distintos autores, los cuales están resumidos en la Tabla 3.3.1. Para esto se hizo una regresión no lineal de los datos obtenidos y se encontraron los coeficientes de cada modelo.

Para el análisis estadístico se realizaron regresiones no lineales para encontrar los parámetros de los modelos de secado, y una regresión multivariable para determinar el efecto de cada variable sobre cada modelo. La ecuación de mejor ajuste se determinó utilizando varios indicadores estadísticos. Esto pues las regresiones no lineales no pueden evaluarse utilizando solamente el coeficiente de determinación. Los indicadores utilizados fueron el coeficiente de determinación

ajustado (R_{ajust}^2), la suma de cuadrados de los residuos (SS_{res}), la desviación estándar del estimado (SE), el error medio relativo (P), y la tendencia de los residuos: un modelo se ajusta a los datos si presenta valores de R_{ajust}^2 cercano a 1, valores bajos de SS_{res} , SE y P, y si sus residuos se comportan como ruido.

Los datos fueron ajustados, mediante regresiones lineales, a ecuaciones polinómicas de primero, segundo y tercer orden, con el fin de generar un modelo propio de la broza. La aptitud del ajuste a estos modelos fue determinada usando el coeficiente de determinación R^2 .

4.3. DIFUSIVIDAD EFECTIVA

La difusividad efectiva (D_{eff}) fue calculada con base en la solución a la segunda ley de Fick para una placa plana (5). De esta ecuación se despejó el valor de D_{eff} .

$$MR(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{2n+1} e^{-(2n+1) \frac{\pi^2}{L^2} D_{\text{eff}} t} \quad (5)$$

donde:

MR(t): relación de humedad para el instante t (adim)

L: ancho de la capa de material (m)

D_{eff} : difusividad efectiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

t: tiempo transcurrido (s)

Debido a la forma de la ecuación, es complicado despejar D_{eff} de manera analítica. Por esto, fue necesario aproximar el valor de esta mediante aproximaciones sucesivas con ayuda de un programa de cómputo de hoja de cálculo.

Las D_{eff} fueron obtenidos para todo el tratamiento, así como para las distintas fases de secado del material, definidas por los puntos críticos (PC) de la velocidad de secado, donde cambian las gradientes de las curvas. Las D_{eff} fueron calculadas para los intervalos definidos por los puntos críticos, añadiendo un traslape de una medición antes y después del PC. Esto quiere decir que, si el primero y segundo PC se registraron en las tomas de dato número 6 y 11, respectivamente, el intervalo utilizado para el cálculo de la D_{eff} se hizo para los datos del 1 al 7, para la primera fase; para los datos del 5 hasta el 12, para la segunda fase; y para los datos del 10 hasta el equilibrio para la tercera fase. Esta metodología es similar a la utilizada por Akanbi et al [26].

4.4. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y FACTOR DE FRECUENCIA

La energía de activación y el factor de frecuencia son parámetros de la ecuación de Arrhenius. Estos parámetros fueron hallados realizando un reacomodo de la ecuación 2 de manera que, esta puede ser expresada de forma lineal:

$$\ln(D_{\text{eff}}) = - \overbrace{\left(\frac{E_a}{R}\right)}^m \frac{1}{T} + \overbrace{\ln(A)}^b \quad (6)$$

donde:

D_{eff} : difusividad efectiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

E_a : energía de activación (kJ mol^{-1}).

A: factor de frecuencia ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

R: constante universal de los gases ($8,3143 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

m: pendiente de la línea de mejor ajuste

b: intersepto de la línea de mejor ajuste.

Las constantes E_a y A pueden calcularse a partir de la pendiente y el intersepto de línea de mejor ajuste de este reacomodo, como se muestra a continuación:

$$E_a = -mR \quad (7)$$

$$A = e^b \quad (8)$$

La variación de la energía de activación a lo largo del proceso de secado se estudió calculando la difusividad efectiva de cada tratamiento para distintas fases de secado, definidas por los gradientes de las curvas de velocidad de secado.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron los contenidos de humedad para cada una de las muestras (Tabla 5.1). La temperatura y la humedad relativa ambiental fueron monitoreadas a lo largo del experimento; los valores promedio se presentan en la Tabla 5.2 y la Tabla 5.3.

Tabla 5.1. Contenido de humedad inicial en base húmeda (CH b.h.) para cada tratamiento.

Temperatura de aire T (°C)	Velocidad de aire v (m s ⁻¹)	Cont. De humedad base húmeda CH b.h. (%)	Desviación Estándar SD (%)
100	0,38	86,5	2,0
100	0,23	85,2	1,1
90	0,38	85,0	1,7
90	0,23	89,1	3,7
80	0,38	89,3	0,9
80	0,23	87,5	3,2

Tabla 5.2. Condiciones de temperatura ambiente en cada tratamiento.

Temperatura de aire T (°C)	Velocidad de aire v (m s ⁻¹)	Temperatura ambiente T _{amb} (°C)	Desviación Estándar SD (°C)
100	0,38	22,0	0,4
100	0,23	23,6	0,2
90	0,38	23,7	0,4
90	0,23	22,8	0,8
80	0,38	21,6	0,6
80	0,23	23,2	0,7

Tabla 5.3. Condiciones humedad relativa ambiente durante cada experimento.

Temperatura de aire T (°C)	Velocidad de aire v (m s ⁻¹)	Humedad Relativa HR (%)	Desviación Estandar SD (%)
100	0,38	94,3	3,1
100	0,23	72,2	1,2
90	0,38	68,7	2,2
90	0,23	78,5	3,6
80	0,38	92,4	3,4
80	0,23	86,1	3,6

5.1. CURVAS DE SECADO Y VELOCIDAD DE SECADO

Las curvas de secado y de velocidad de secado obtenidas pueden observarse de la Figura 5.1.1 a la 5.1.2. En la segunda se pueden observar las tendencias esperadas: el periodo de secado a velocidad creciente, constante y por último las dos etapas decrecientes: lineal y exponencial. La alta variabilidad en la zona de secado a velocidad constante se debe a la colocación de las bandejas dentro del horno: algunas quedaron más cerca del ventilador, por lo que se intercambiaron sus posiciones de forma periódica.

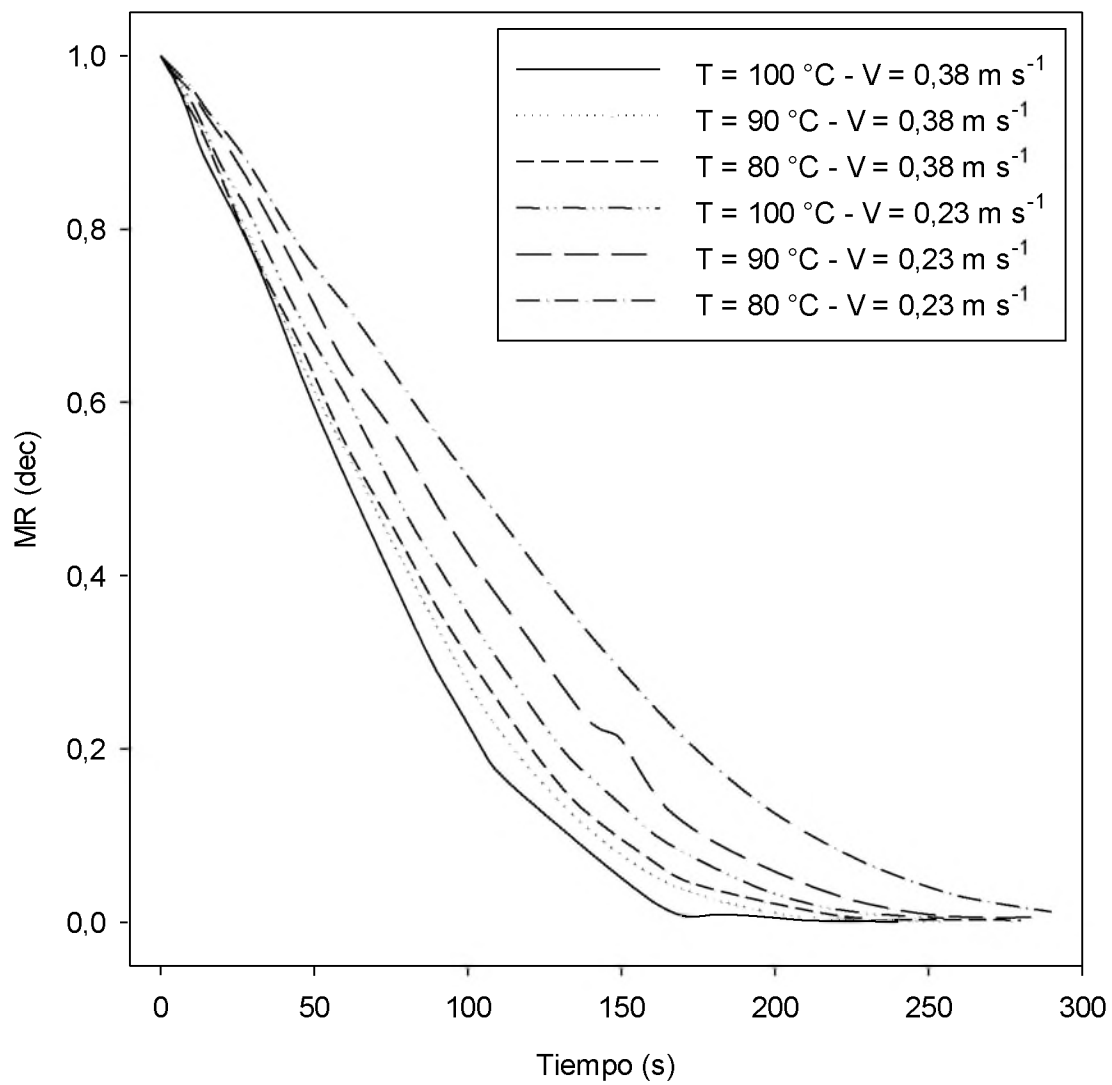


Figura 5.1.1 Curvas de relación de humedad promedio contra tiempo para cada tratamiento.

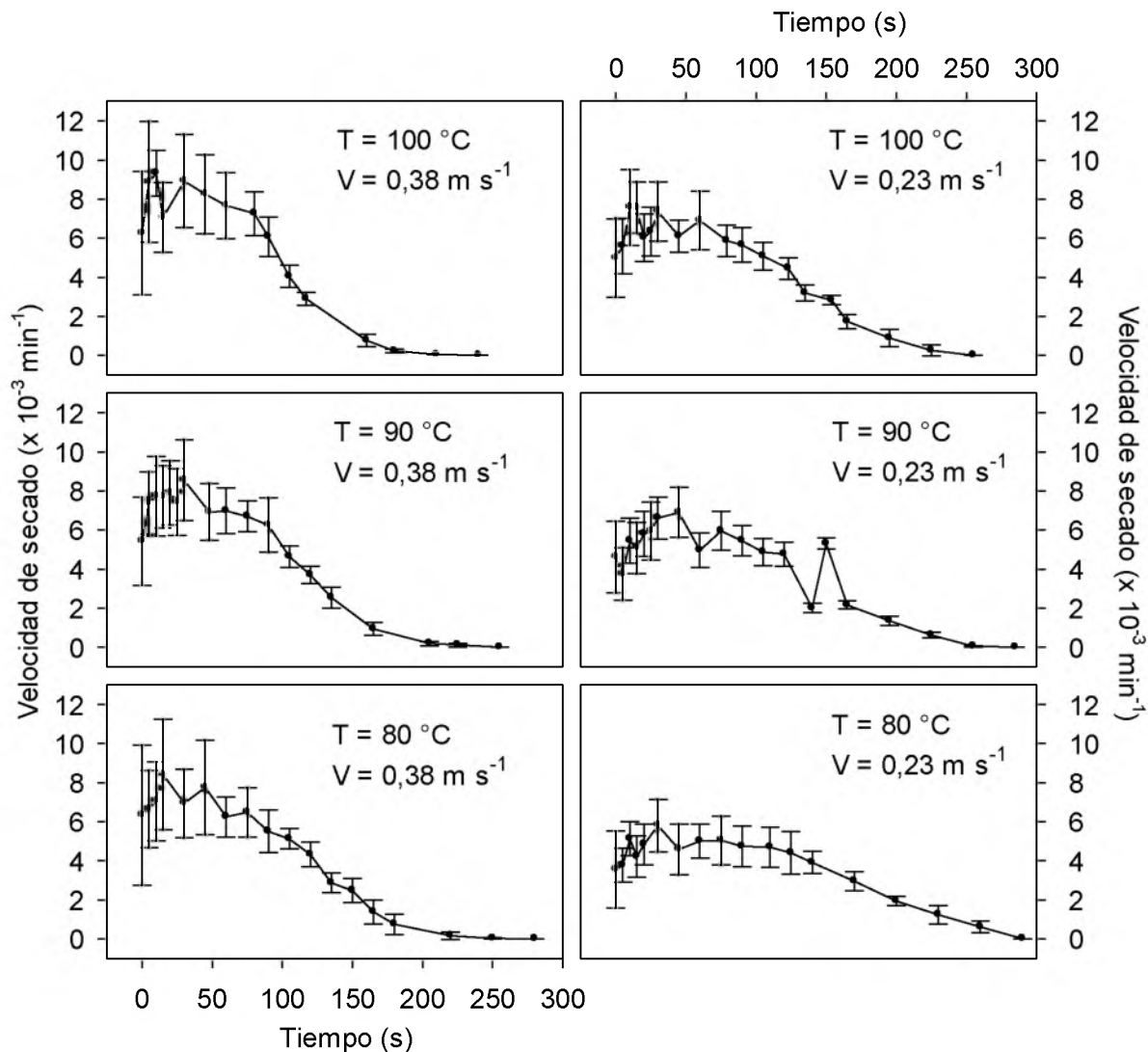


Figura 5.1.2 Curvas de velocidad de secado ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) contra tiempo (s) para cada tratamiento.

En el tratamiento a 100 °C y 0,38 m s⁻¹ el material se calentó rápidamente y no hay una zona de calentamiento marcada. La etapa de velocidad constante empezó muy cerca del inicio del secado. La zona de velocidad constante finalizó aproximadamente al minuto 90, antes de la etapa a velocidad decreciente.

Para la velocidad de $0,38 \text{ m s}^{-1}$, los tratamientos a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ y $90 \text{ }^\circ\text{C}$ mostraron un comportamiento similar al de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. No obstante, las diferencias de velocidad de secado son notables respecto al tratamiento a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0,38 \text{ m s}^{-1}$, especialmente en la etapa de secado a velocidad constante. Entre los tratamientos a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ y $80 \text{ }^\circ\text{C}$, ambos a $0,38 \text{ m s}^{-1}$, se notan algunas diferencias leves, pero la humedad relativa pudo haber tenido un efecto en los valores obtenidos en el experimento.

Para los tratamientos a $0,23 \text{ m s}^{-1}$ los contrastes entre las curvas se hacen más apreciables. La etapa de velocidad constante finaliza aproximadamente entre los 120 min y los 160 min. Además se pueden notar diferencias marcadas en las velocidades para cada par de curvas a una misma temperatura.

5.2. MODELOS DE SECADO

En las Figuras 5.2.1 a 5.2.2 se pueden observar los indicadores de ajuste para regresiones no lineales. Los modelos de dos términos y el de Henderson y Pabis modificados no fueron considerados pues sus coeficientes en el exponente siempre dieron un mayor ajuste cuando eran iguales entre sí. Esto se pudo comprobar dado que sus residuos resultaron iguales a los del modelo de Henderson y Pabis. Se decidió analizar únicamente este último pues es el que tiene el número menor de coeficientes.

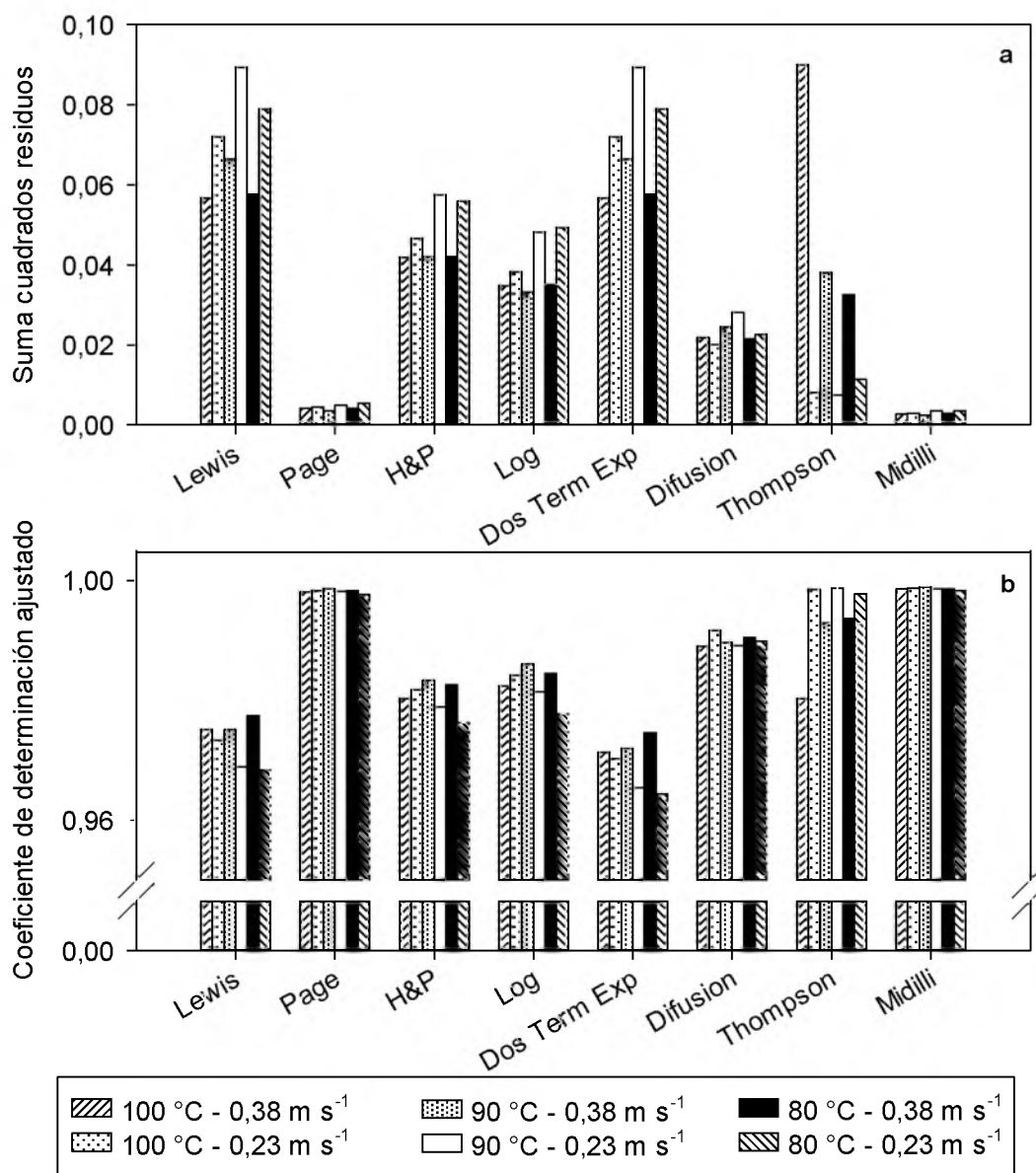


Figura 5.2.1. Suma de cuadrados de los residuos (a) y Coeficiente de determinación ajustado (b) de los tratamientos.

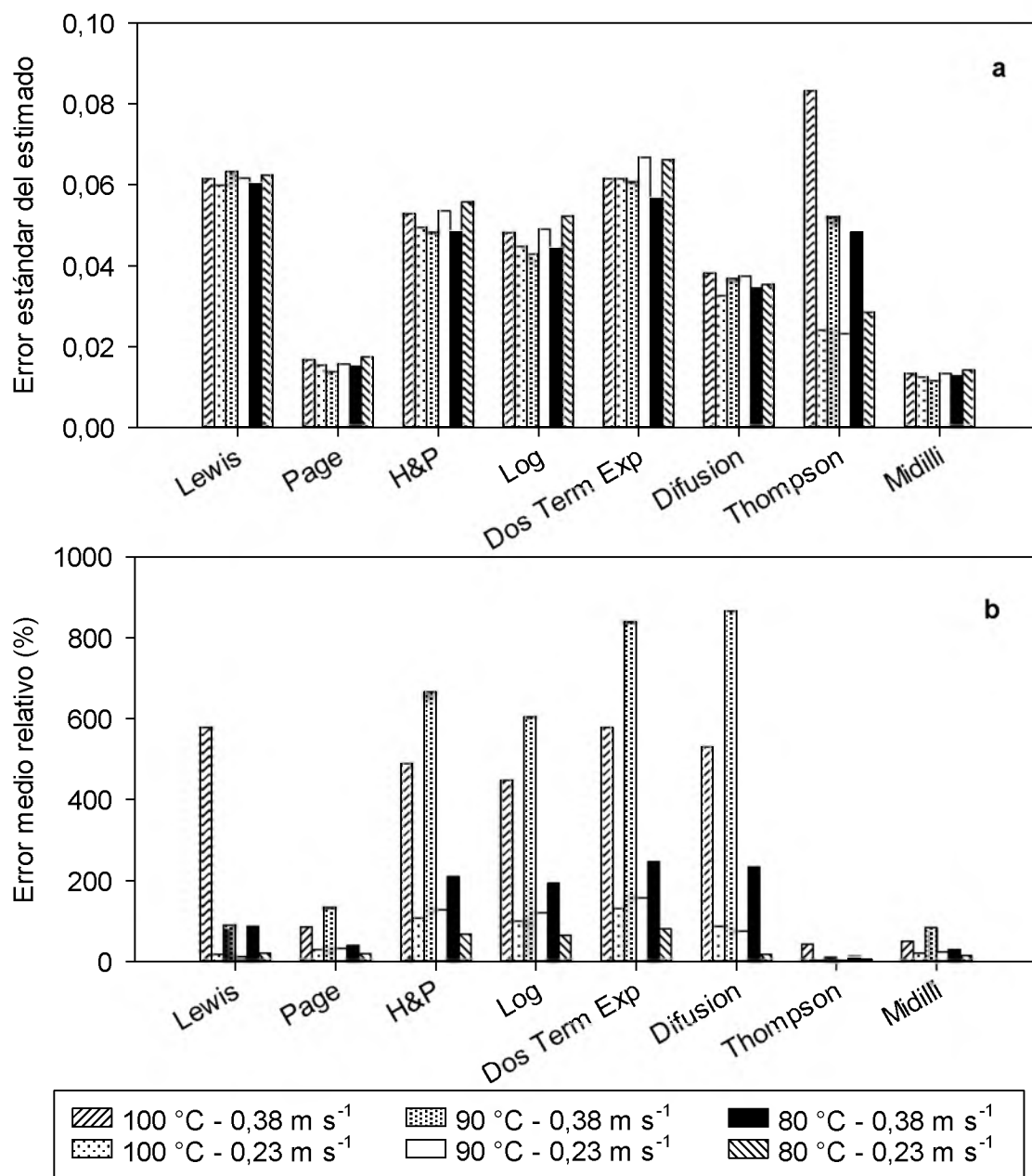


Figura 5.2.2. Error estándar del estimado (a) y Error medio relativo (b) de los tratamientos.

De la Figura 5.2.1a se pueden destacar los modelos de Page y Midilli con las menores sumas de cuadrados de los residuos, lo que implica que las diferencias respecto a los valores experimentales es menor. Por otro lado, el modelo de Lewis y el exponencial de dos términos son los que obtuvieron valores más altos en este rubro. El modelo de Thompson tiene un rendimiento bueno en algunos tratamientos, pero se eleva considerablemente en el tratamiento de temperatura de 100 °C y velocidad de 0,38 m s⁻¹.

En la Figura 5.2.1b nuevamente se pueden destacar los modelos de Page y de Midilli con los coeficientes de determinación ajustados más cercanos a la unidad, lo que implica que la varianza de sus residuos es baja en comparación con la de los datos. Los modelos de Thompson y de Difusión tuvieron un desempeño relativamente aceptable, teniendo mejores valores el primero, pero menos variabilidad el segundo. Los modelos de Lewis y de dos términos exponencial tuvieron otra vez un rendimiento relativamente bajo.

La Figura 5.2.2a muestra los errores estándar de los estimados de los modelos. La tendencia se repite, pero esta vez no se notan diferencias importantes entre los modelos de Thompson, Difusión, Lewis y exponencial de dos términos. Los modelos de Page y Midilli tienen los valores más bajos de este rubro.

Por último, en la Figura 5.2.2b se puede notar que el error medio relativo de los modelos de Page, Thompson y Midilli es bajo. El modelo de Lewis muestra un

comportamiento igualmente aceptable a excepción del tratamiento a 100 °C y 0,38 m s⁻¹. Los otros cuatro modelos tienen valores especialmente altos en los tratamientos a 0,38 m s⁻¹, tanto a 100 °C como a 90 °C.

Como resultado de este análisis se analizará la tendencia de los residuos de los tres modelos que tuvieron el mejor desempeño en los indicadores anteriores: Page, Midilli y Thompson. Algunos autores han reportado la idoneidad de estos modelos para okra, zanahoria, chiles verdes, frijol verde y uva usando Page [21,23,24,33–36]; para ayote, papa, manzana, berenjena y manzana golden usando Midilli [22,32,37,38] y para higos usando Thompson [29].

En la Figura 5.2.3 se pueden observar los residuos de los tres modelos seleccionados para cada uno de los tratamientos. Se puede ver que los residuos tienen tendencias marcadas (con forma parabólica) para el modelo de Thompson en los tratamientos a 100 °C y 0,38 m s⁻¹, a 90 °C y 0,38 m s⁻¹, 80 °C y 0,38 m s⁻¹, y 80 °C y 0,23 m s⁻¹, lo que implica que es menos apto para representar a los datos.

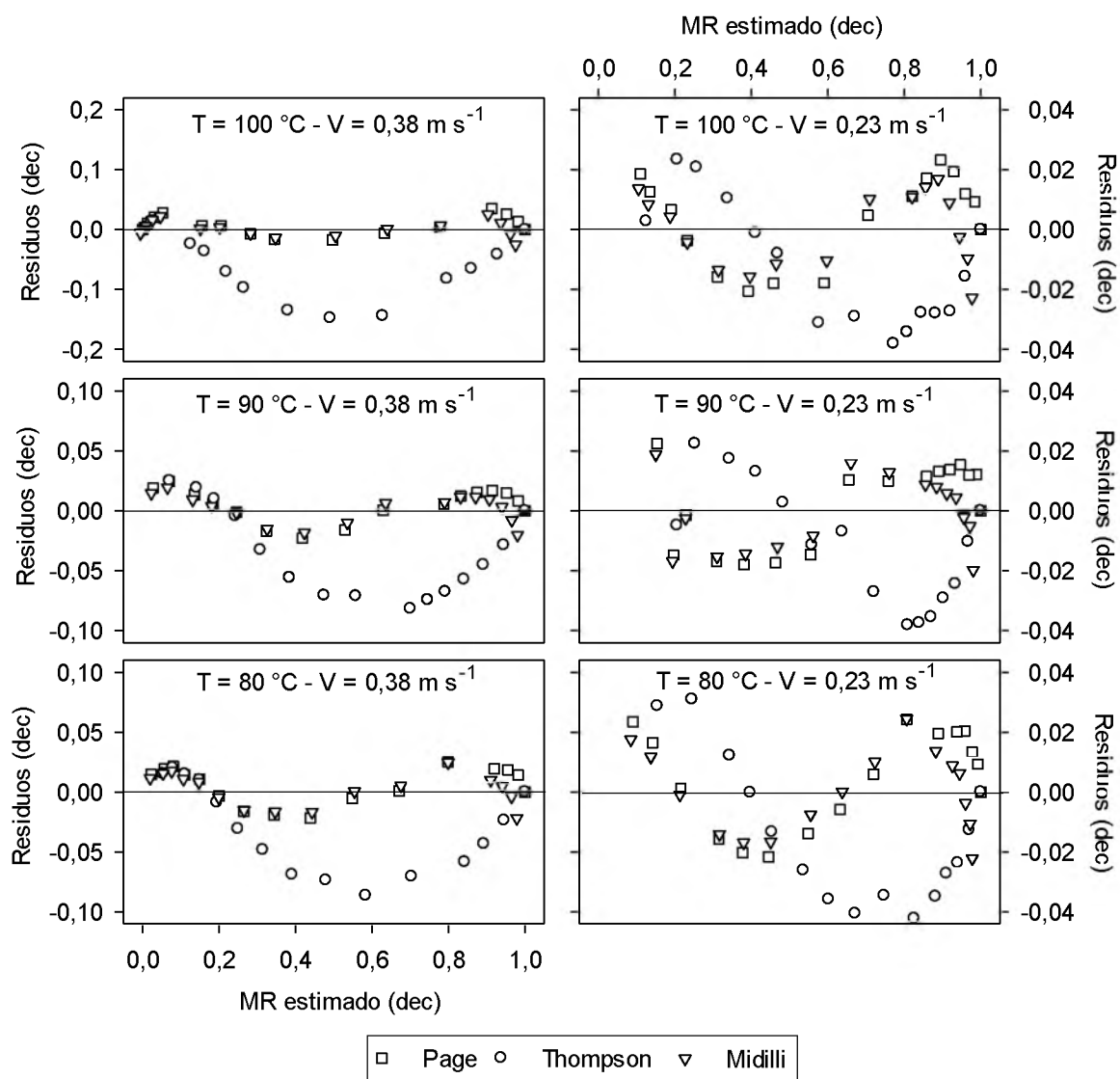


Figura 5.2.3. Distribución de los residuos de los modelos para cada tratamiento. En el eje x se muestran los valores estimados por los modelos, mientras que en el eje y se muestran los residuos correspondientes.

A excepción del tratamiento a 100 °C y 0,38 m s⁻¹, los residuos en el resto de los modelos tienen similitud con una curva sinusoidal. Dado que las magnitudes de los residuos son bajas para estos casos se puede considerar que las curvas no tienen una tendencia marcada. Por eso, tanto el modelo de Midilli como el de Page son alternativas viables para modelar el comportamiento de la broza de café durante el secado. No obstante, el modelo que será seleccionado es el de Page, dado que utiliza un número menor de coeficientes. En la Tabla 5.2.1 se muestran los valores obtenidos de los coeficientes de este modelo. La Figura 5.2.4 es una gráfica de las curvas generadas por los ajustes del modelo de Page a cada condición de secado.

Tabla 5.2.1 Valores de los coeficientes de ajuste del modelo de Page para el secado de la broza de café.

T (°C)	v (m s ⁻¹)	k ₁ (×10 ⁻³)	k ₂
100	0,38	1,714	1,468
100	0,23	1,595	1,417
90	0,38	1,936	1,415
90	0,23	1,026	1,471
80	0,38	1,796	1,420
80	0,23	0,782	1,477

Modelo: $MR=e^{-k_1 t^{k_2}}$

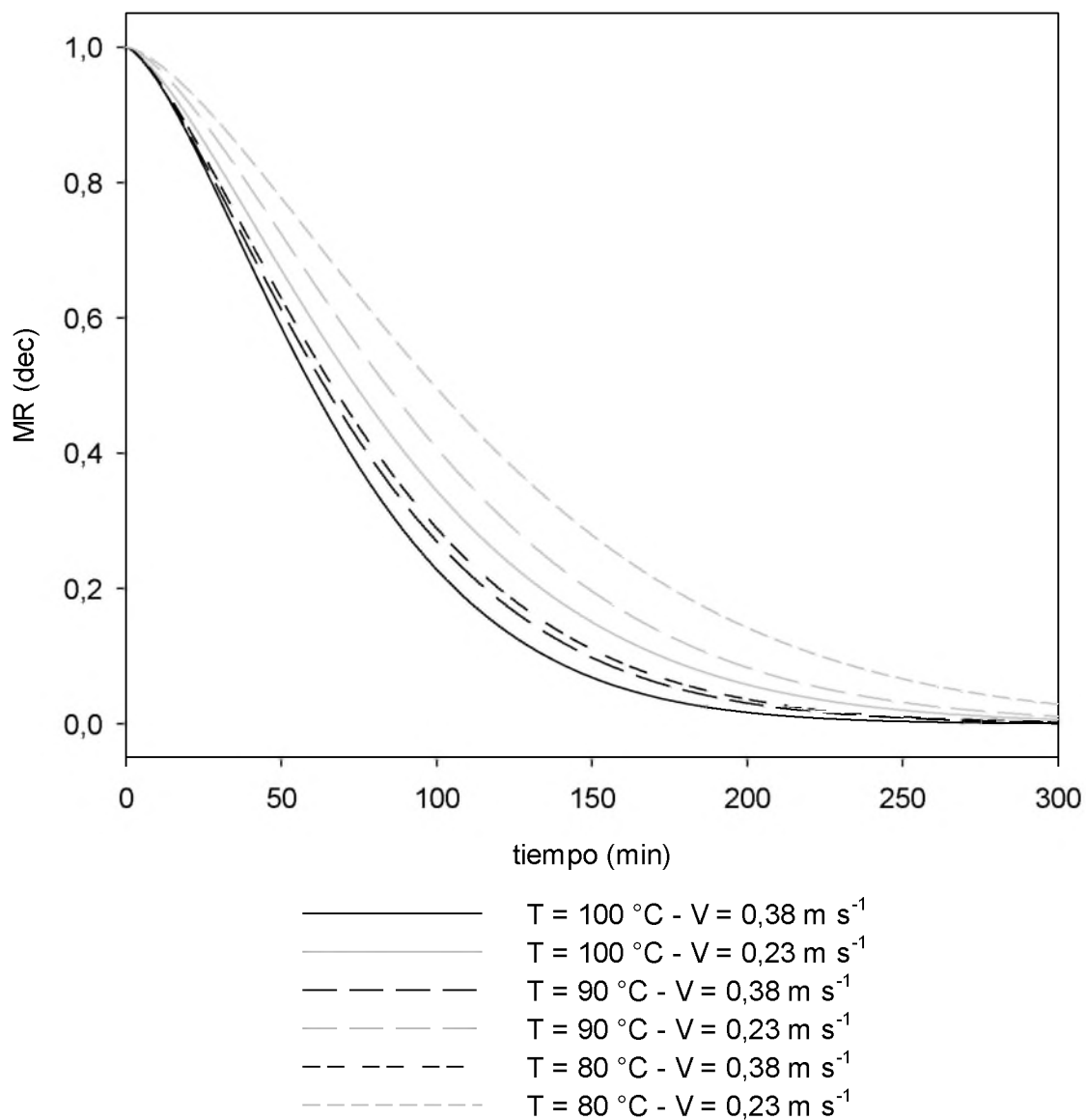


Figura 5.2.4 Curvas de la ecuación de Page para los coeficientes mostrados en la Tabla 5.2.1.

Para el análisis de regresión multivariada sobre los coeficientes k_1 y k_2 del modelo de Page, se consideró el efecto de las variables de temperatura (T) y velocidad del aire (v), así como el producto de ambas ($T \cdot v$). El principal indicador de la aptitud de la regresión fue el coeficiente de determinación ajustado.

Para el caso del coeficiente k_1 , en la Tabla 5.2.2 se puede observar que los mejores modelos son aquellos en que se usa solo el producto, o este junto a las otras dos variables. La combinación de las variables T y v dan un coeficiente de determinación ajustado de 0,627, y la adición de este tercer término ($T \cdot v$) incrementa considerablemente el ajuste de este modelo.

Tabla 5.2.2 Coeficiente de determinación ajustado de las regresiones de los coeficientes del modelo de Page para broza de café, utilizando distintas combinaciones de variables.

Variables	R_{ajust}^2	
	k_1	k_2
T	0	0
v	0,564	0
$T \cdot v$	0,631	0
T - v	0,627	0
T - $T \cdot v$	0,516	0
V - $T \cdot v$	0,514	0
T - V - $T \cdot v$	0,908	0,477

El coeficiente k_2 , por otro lado, resulta más problemático de relacionar con las variables de temperatura y velocidad del aire directamente. Se puede observar que la única condición en la que se obtiene un R^2 mayor a cero es cuando se usan

las tres variables, y esto solo permite un valor de 0,477. Por lo tanto, los coeficientes se pueden expresar como una combinación de las variables de entrada mediante las siguientes ecuaciones:

$$k_1 = 0,00974 + 0,000109 T + 0,0314 v - 0,000298 T \cdot v \quad (9)$$

$$k_2 = 2,498 - 0,0112 T - 3,368 v + 0,0359 T \cdot v \quad (10)$$

donde:

T: temperatura del aire de secado ($^{\circ}\text{C}$)

v: velocidad del aire (m s^{-1})

k_1 : coeficiente del modelo de Page

k_2 : coeficiente del modelo de Page

No obstante, el uso de las ecuaciones 9 y 10 queda sujeto a las deficiencias inherentes del ajuste del coeficiente k_2 . Esta condición puede evaluarse en la Tabla 5.2.3. Se recomienda la profundización en el análisis de rangos de temperatura y velocidades de aire mayores para mejorar la capacidad predictiva de un modelo de este tipo. Además se debe mejorar esta ecuación realizando réplicas de este experimento para la broza de café de otras zonas del país y otras fechas de cosecha.

Tabla 5.2.3 Residuos, suma de cuadrados de los residuos y error estándar de la estimación del coeficiente k_2 utilizando la ecuación 6.

T (°C)	V (m s ⁻¹)	Residuos
100	0,38	0,006
100	0,23	-0,012
90	0,38	-0,023
90	0,23	0,013
80	0,38	0,006
80	0,23	-0,011
SS _{res}		0,00101
SE		0,0143

Diversos autores han ajustado los coeficientes para varios parámetros del aire: Hossain y Bala [33] para chiles, en el intervalo de temperaturas, velocidad de aire y humedad relativa de 40 °C - 65 °C, 1 m s⁻¹ - 1,5 m s⁻¹ y 10 % - 60 %; Yaldíz y Ertekýn [34] para frijoles, en el intervalo de temperaturas y velocidad de aire de 50 °C - 80 °C y 1 m s⁻¹ - 1,5 m s⁻¹; Sawhney et al [35], modelando el comportamiento de k_1 , para temperaturas y velocidades de aire de 30 °C - 70 °C y 0,5 m s⁻¹ - 2 m s⁻¹; y Erenturk y Erenturk [36] para zanahorias, en el intervalo de temperaturas y velocidad de aire de 60 °C - 90 °C y 0,5 m s⁻¹ - 1,5 m s⁻¹.

En la Tabla 5.2.4 se puede observar el coeficiente de determinación de los ajustes polinómicos para cada tratamiento. Los R^2 más cercanos a uno son aquellos obtenidos a partir de la regresión de tercer orden. Sin embargo, se presentan en la Tabla 5.2.5 los coeficientes de ajuste para la ecuación de segundo grado de cada

tratamiento, ya que las diferencias respecto a la de tercer grado son del orden de 10^{-3} y estas utilizan un coeficiente menos.

Tabla 5.2.4. Coeficientes de determinación de ajustes polinómicos de primero, segundo y tercer orden para cada tratamiento.

$V (m s^{-1})$	T(°C)					
	100		90		80	
	Orden	R^2	Orden	R^2	Orden	R^2
0,38	1	0,8803	1	0,8919	1	0,8634
	2	0,9977	2	0,9984	2	0,9986
	3	0,9978	3	0,9984	3	0,9986
0,23	1	0,9286	1	0,9315	1	0,9649
	2	0,9985	2	0,9976	2	0,9978
	3	0,9993	3	0,9990	3	0,9998

Tabla 5.2.5 Coeficientes de regresión de ecuación de ajuste polinómico de segundo orden para cada uno de los tratamientos.

$v (m s^{-1})$	T (°C)	a ($\times 10^{-5}$)	b ($\times 10^{-1}$)	c
0,38	100	3	10,3	1,0258
	90	2	9,6	1,0309
	80	2	9,0	1,0191
0,23	100	2	8,5	1,0319
	90	1	7,6	1,0399
	80	0,9	6,2	1,0298

Modelo: $MR = a t^2 + b t + c$.

5.3. DIFUSIVIDAD EFECTIVA, ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y FACTOR DE FRECUENCIA.

A partir de los resultados de relación de humedad obtenidos se calculó la difusividad efectiva de cada condición de secado, correspondiente a cada una de las curvas de secado obtenidas. Para esto, se resolvió la ecuación 3 hasta $n = 20$, usando aproximaciones en una hoja de cálculo hasta reducir al mínimo la suma de cuadrados de los residuos, como fue comentado en la metodología. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 5.3.1.

Tabla 5.3.1 Difusividad efectiva de cada condición de secado y la suma de cuadrados de los residuos correspondiente.

T (°C)	v (m s ⁻¹)	D _{eff} (×10 ⁻⁹ m ² s ⁻¹)	SS _{res} (m ² s ⁻¹)
100	0,38	11,351	0,178
90	0,38	9,959	0,237
80	0,38	10,451	0,188
100	0,23	8,793	0,255
90	0,23	7,649	0,294
80	0,23	6,300	0,256

Para efectos de cálculo de la difusividad en este experimento, una placa plana de material poroso, las condiciones de frontera son dadas en la superficie de la capa de broza. No obstante, dentro de la capa existe una combinación heterogénea de materiales, entre los cuales se pueden encontrar cascaras, semillas y hasta trozos de madera. El movimiento de las partículas de agua en cada elemento es distinto, y depende de la forma y propiedades de cada material. Asimismo, la condición de

frontera real es aquella a la que está sometido individualmente cada elemento que compone a la broza de café, y existen una serie de mecanismos ajenos a la difusión que modifican los patrones de transporte de masa.

Se puede observar en la Tabla 5.3.1 que para una misma temperatura, a medida que aumenta la velocidad del aire, aumenta también la difusividad efectiva. Esto concuerda con la teoría de la difusión, puesto que las moléculas, al desplazarse hacia la frontera y convertirse en vapor, aumentan la presión de vapor del aire que se encuentra dentro del material poroso. Cuando el viento es forzado a entrar en el material, el aire húmedo dentro de la matriz es reemplazado con aire seco, y la rapidez de este reciclaje de aire aumenta conforme la velocidad del aire se incrementa.

Se observa en la Tabla 5.3.1 una tendencia al aumento de la difusividad con respecto a la temperatura. No obstante, debe notarse la difusividad para el caso de la temperatura de 90 °C y velocidad de 0,38 m s⁻¹, puesto que esta tendencia no se cumple para este caso particular. Este efecto puede atribuirse a las condiciones del experimento: obsérvese en la Tabla 5.2 que la humedad relativa del ambiente para este tratamiento (90 °C y 0,38 m s⁻¹) fue aproximadamente un 20 % menor al de los otros dos experimentos a la misma velocidad de aire (100 °C y 80 °C). Debe recordarse que el supuesto de que la difusividad efectiva se mantiene constante a lo largo del proceso de secado también puede llegar a afectar los resultados obtenidos.

Corrêa, Resende y Menezes Ribeiro [57] obtuvieron valores de difusividad efectiva para el fruto entero de café. Las condiciones de secado que estudiaron fueron de temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C, y los resultados de coeficiente de difusión fueron de $2,91 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $3,57 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ y $4,96 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, respectivamente. Estos valores son considerablemente menores al de la broza de café puesto que esta ya se encuentra desmembrada y separada de la fibra, no cuenta con una cáscara, además de que su forma y sus dimensiones cambian el comportamiento del agua y el vapor dentro y fuera del material. Debe considerarse además, que para el presente experimento las temperaturas del aire de secado fueron considerablemente más altas.

Los valores de coeficiente de difusividad obtenidos se asemejan a los reportados para tomates, a una velocidad de aire similar, de $0,13 \text{ m s}^{-1}$ [26]. Para condiciones de secado a menores temperaturas pero mayores velocidades de aire se encuentran similitudes respecto a los reportados para zanahoria [23,28,31]. Los valores obtenidos se encuentran en el rango de 10^{-9} - 10^{-11} , para diversos productos agrícolas [58].

Las energías de activación y el factor de frecuencia fueron obtenidos a partir del reacomodo de la ecuación de Arrhenius como fue mencionado en la metodología. Las curvas necesarias para el cálculo están graficadas en la Figura 5.3.1. Se obtuvieron energías de activación de $4,432 \text{ kJ mol}^{-1}$ y $18,289 \text{ kJ mol}^{-1}$, para las

velocidades de $0,38 \text{ m s}^{-1}$ y $0,23 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. Los valores de factor de frecuencia para estas mismas condiciones fueron de $4,59 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $3,22 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

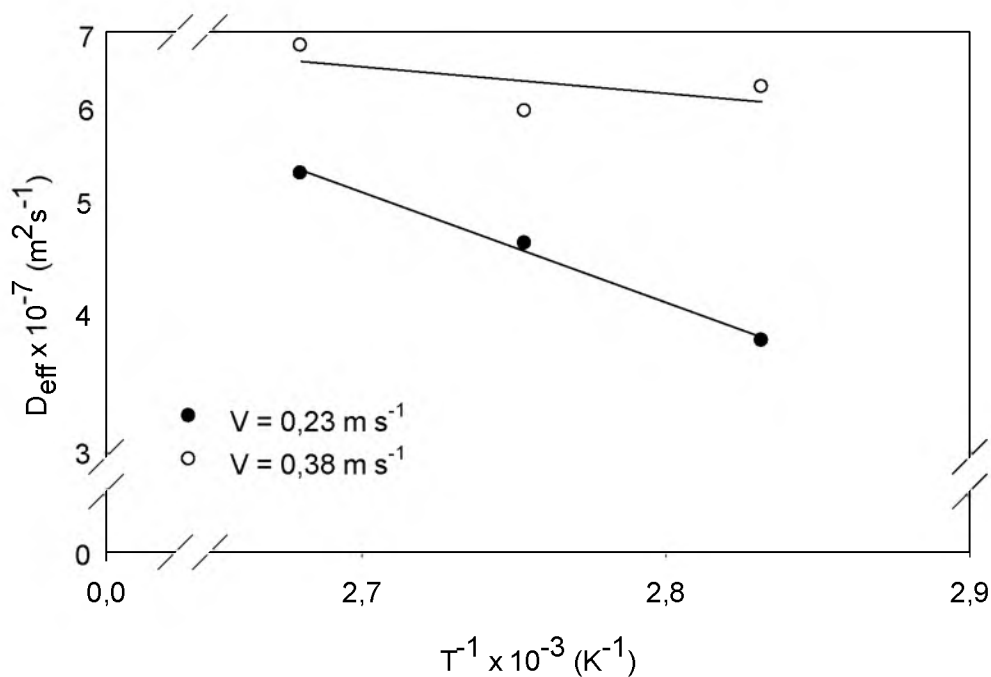


Figura 5.3.1 Difusividad efectiva en función del inverso de la temperatura.

Corrêa et al. [57] encontraron una energía de activación de $22,619 \text{ kJ mol}^{-1}$ y un factor de frecuencia de $2,041 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el fruto de café natural, los cuales fueron similares a los obtenidos experimentalmente. Las diferencias pueden atribuirse a la velocidad de secado. Debe notarse que en este trabajo solo se analizó el comportamiento del secado de la broza y no de todo el fruto.

Los valores de energía de activación son contrastables con los reportados para tomate con un valor de $32,94 \text{ kJ mol}^{-1}$ para una velocidad de aire de $1,5 \text{ m s}^{-1}$ [27], para okra [21], de $51,26 \text{ kJ mol}^{-1}$ y para zanahoria [23] de $28,36 \text{ kJ mol}^{-1}$, ambos a 1 m s^{-1} o los reportados en el rango de $30,81 \text{ kJ mol}^{-1}$ - $48,47 \text{ kJ mol}^{-1}$, para velocidades de secado entre $0,5 \text{ m s}^{-1}$ y 3 m s^{-1} en zanahoria [25]. Debe aclararse que, en este último experimento se evidenció que la energía de activación no necesariamente aumenta a medida que se incrementa la velocidad de viento, y más bien los autores encontraron un valor mínimo aproximadamente a $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

Zogzas, Maroulis y Marinos-Kouris [59] notaron que las energías de activación de los productos agrícolas se encuentran entre los $12,7 \text{ kJ mol}^{-1}$ y los 110 kJ mol^{-1} . El valor de energía de activación de la broza de café para $0,38 \text{ m s}^{-1}$ se sale de este rango. Esto puede deberse, primero a que esta velocidad de secado es alta, y que el producto es particularmente húmedo, además de que las condiciones de temperatura y humedad relativa son distintas. Además, debe considerarse la posibilidad de que la energía de activación no se mantenga constante durante todo el proceso de secado.

Debido a esto último se realizó un análisis de difusividad para distintas fases de secado. Las fases fueron divididas por los puntos críticos de las curvas de

velocidad de secado, como fue explicado en la metodología. Los resultados se pueden observar en las Tablas 5.3.2 y 5.3.3.

Tabla 5.3.2 Difusividad efectiva de cada fase de secado, con los puntos críticos correspondientes (expresados como relación de humedad), para cada tratamiento.

v (m s ⁻¹)	T (°C)	PC ₁ (10 ⁻¹)	PC ₂ (10 ⁻¹)	D _{eff} (10 ⁻⁹ m ² s ⁻¹)			SS _{res} (10 ⁻² m ² s ⁻¹)
				Fase 1	Fase 2	Fase 3	
0,38	100	3,61	0,24	8,023	13,282	18,821	6,84
	90	3,40	0,45	7,214	12,641	17,591	9,11
	80	4,60	0,38	6,497	11,746	18,617	5,80
0,23	100	4,12	1,22	5,683	10,347	14,039	7,38
	90	5,70	1,31	3,579	8,657	12,416	5,83
	80	4,67	1,25	3,792	7,230	10,454	6,58

Tabla 5.3.3 Energía de activación y factor de frecuencia de cada fase de secado, para las dos velocidades de aire estudiadas.

v (m s ⁻¹)	Fase	E _a (kJ mol ⁻¹)	A (10 ⁻⁸ m ² s ⁻¹)
0,38	1	11,56	33,25
	2	6,74	11,72
	3	0,54	2,19
0,23	1	21,90	603,57
	2	19,63	578,49
	3	16,17	259,50

La difusividad efectiva aumenta considerablemente a medida que se cambia de etapa de secado en las curvas (Tabla 5.3.2). También puede observarse como, para cada fase, este parámetro aumenta con respecto a la temperatura y a la

velocidad del aire. Este comportamiento es similar al esperado cuando se analiza la difusividad como constante a lo largo del procedimiento.

Un comportamiento similar al obtenido en este experimento fue el que obtuvo Akanbi et al [26] para tomates: un aumento de la difusividad efectiva a medida que se pasa de fase de secado. Esto puede ser interpretado como que la difusividad presenta una correlación inversa con la velocidad de secado. A medida que cambian las proporciones de agua superficial, adsorbida y capilar, cambian los mecanismos que gobiernan el flujo de agua y vapor, los cuales son resumidos en difusividad efectiva. Esta relación es interpretada a partir de los análisis que hacen Crank y Whitaker [49,50] respecto a la difusión pura.

La energía de activación analizada por fases también aumenta a medida que se disminuye la velocidad de secado (Tabla 5.3.3). Esta tendencia es contrastable con la reportada por Babalis et al [25], quienes encontraron un mínimo en el rango de temperaturas. Sin embargo, esto no invalida los resultados encontrados, y solo demuestra la necesidad de hacer análisis más profundos respecto al efecto de la velocidad de aire de secado sobre la energía de activación de la broza de café.

Otra observación destacable es que la energía de activación y el factor de frecuencia disminuyen a medida que se cambia de etapa de secado. Estos resultados contrastan con los reportados por Akanbi et al [26]: A partir de los datos que los autores reportan se puede obtener que las energías de activación para la

primera, segunda y tercera fase son de $15,36 \text{ kJ mol}^{-1}$, $18,47 \text{ kJ mol}^{-1}$ y $1,93 \text{ kJ mol}^{-1}$ respectivamente. Los valores correspondientes de factor de frecuencia son de $2,63 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $3,84 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $8,59 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esto implicaría que no necesariamente estas propiedades presentan una tendencia igual en todos los materiales. Más bien, no se puede conocer de primera mano cual etapa tendrá la energía de activación o el factor de frecuencia mayores, pero si se puede intuir que la tercera fase siempre tendrá valores menores que las otras dos.

6. CONCLUSIONES

Las curvas de secado de la broza de café en horno convectivo obtenidas tienen un comportamiento esperado. La zona de calentamiento de la primera etapa es ligeramente apreciable solo en las curvas de secado a la velocidad de $0,23 \text{ m s}^{-1}$.

El modelo obtenido de la literatura que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de Page. Se obtuvo un ajuste adecuado a una ecuación polinómica de segundo orden.

Se brindó una ecuación con la que se puede encontrar la relación de humedad para el intervalo de humedades y velocidades de aire estudiados. Además, se encontraron los coeficientes respectivos que brindan mejor ajuste a este modelo.

Los coeficientes de difusividad efectiva se encuentran en el rango de $6,300 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ a $11,351 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. La difusividad aumentó con la temperatura y la velocidad del aire. Los valores más alto y más bajo se obtuvieron en los tratamientos a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0,38 \text{ m s}^{-1}$, y a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0,23 \text{ m s}^{-1}$ respectivamente.

Las energías de activación fueron de $4,432 \text{ kJ mol}^{-1}$ y $18,289 \text{ kJ mol}^{-1}$ para las velocidades de $0,38 \text{ m s}^{-1}$ y $0,23 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. La energía de activación disminuye con la velocidad del aire y el cambio de etapa. Las energías de activación de cada fase están dentro del rango esperado, con la excepción de la segunda y tercera etapa de secado del tratamiento a $0,38 \text{ m s}^{-1}$.

7. RECOMENDACIONES

- Ampliar los tratamientos realizados en el experimento, incluyendo un rango mayor de temperaturas y velocidades del aire.
- Usar muestras de otras épocas de cosecha y de distintas partes del país para enriquecer el análisis y mejorar la capacidad predictiva de los modelos propuestos.
- Complementar el estudio con experimentos para obtener los contenidos de humedad de equilibrio de la biomasa a altas y bajas temperaturas, con el fin de mejorar la capacidad de modelar el proceso de secado en otras condiciones.
- Realizar el experimento controlando la humedad relativa ambiental, preferiblemente en un laboratorio. Las condiciones de humedad deben ser llevadas a un rango similar al que se trabaje en los beneficios de café.
- Utilizar un sistema de medición automática de pesos, además de monitorear otras variables como la temperatura interna del material, caídas de presión, cambios de volumen, entre otros. Las mediciones pueden dar información de mucho valor si los datos son obtenidos en tiempo real y con intervalos de medición menores.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. World energy situation. En: Introduction to Global Energy Issues [Internet]. CRC Press; 2013. p. 127–53.
2. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops [Internet]. 2014 [Acceso 30 de Nov 2015]. Disponible en:
<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
3. Kitani O. Biomass Handbook. Kitani O, Hall CW, editors. New York: Gordon and Breach Science Publishers; 1989.
4. Imbach P. Valoración de los residuos biomásicos en Costa Rica usando sistemas de información geográfica [Internet]. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza; 2005. Disponible en:
<http://www.sidalc.net/repdoc/A4134E/A4134E.PDF>
5. Coto Chinchilla O. Evaluación de la Generación de Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) en Costa Rica e Identificación de Sector Prioritario Invernadero en Costa Rica [Internet]. San José, Costa Rica; 2013. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolas-org/productos/Informe RAO CR Producto 1.pdf](http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolas-org/productos/Informe%20RAO%20CR%20Producto%201.pdf)
6. Aguiar L, Márquez-Montesinos F, Gonzalo A, Sánchez JL, Arauzo J. Influence of temperature and particle size on the fixed bed pyrolysis of orange peel residues. J Anal Appl Pyrolysis. 2008;83(1):124–30.

7. Callejón-Ferre AJ, Velázquez-Martí B, López-Martínez JA, Manzano-Agugliaro F. Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renew Sustain Energy Rev.* 2011;15(2):948–55.
8. Wilson L, John GR, Mhilu CF, Yang W, Blasiak W. Coffee husks gasification using high temperature air/steam agent. *Fuel Process Technol.* 2010;91(10):1330–7.
9. Parikh J, Shukla V. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development. *Glob Environ Chang.* 1995;5(2):87–103.
10. International Energy Agency. Costa Rica: Balances for 2003 [Internet]. 2016 [Acceso 14 de Nov 2016]. Disponible en:
<http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=COSTARICA&product=balances&year=2003>
11. British Petroleum. BP statistical review of world energy June 2015 [Internet]. Londres: British Petroleum; 2015. Disponible en:
<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>
12. Jiménez Gómez R. Políticas y Acciones del ICE para Integrar la Biomasa a la Generación Eléctrica: Retos y Oportunidades [Internet]. San José, Costa Rica; 2012. Disponible en:

<https://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443&s=2521&d=8994>

13. Amos W. Report on Biomass Drying Technology [Internet]. St. Paul (MN): United States Department of Energy; 1998. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>
14. Hulkkonen S, Heinonen O, Tiihonen J, Impola R. Drying of wood biomass at high pressure steam atmosphere; experimental research and application. *Dry Technol.* 1994;12(4):869–87.
15. Noriega Salazar A, Silva Acuña R, García de Salcedo M. Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootec Trop* 2008;26(4):411–9.
16. Instituto del Café de Costa Rica. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica [Internet]. Heredia, Costa Rica; 2016 [Acceso 10 de Ene 2017]. Disponible en: http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/InformeActividadCafetalera.pdf.pdf
17. Loria D. Estado del arte y novedades de la bioenergía en Costa Rica. En: *La Bioenergía en América Latina y El Caribe El estado de arte en países seleccionados*. Santiago, Chile: Food and Agriculture Organization; 2013. p. 181–218.

18. Dirección Sectorial de Energía. VI Plan Nacional de Energía 2012-2030. San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica; 2011.
19. Instituto Costarricense de Electricidad. Plan de expansión de la generación eléctrica Periodo 2014-2035. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad; 2014.
20. Montero G. Desarrollo de Pellets Mediante Densificación con Mezclas de Residuos Agrícolas de Costa Rica [tesis de licenciatura]. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica; 2016.
21. Doymaz İ. Drying characteristics and kinetics of okra. *J Food Eng.* 2005;69(3):275–9.
22. Ertekin C, Yaldiz O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J Food Eng.* 2004;63(3):349–59.
23. Doymaz İ. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *J Food Eng.* 2004;61(3):359–64.
24. Zielinska M, Markowski M. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chem Eng Process Process Intensif.* 2010;49(2):212–8.
25. Babalis SJ, Papanicolaou E, Kyriakis N, Belessiotis VG. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *J Food Eng.* 2006;75(2):205–14.

26. Akanbi CT, Adeyemi RS, Ojo A. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *J Food Eng.* 2006;73(2):157–63.
27. Doymaz İ. Air-drying characteristics of tomatoes. *J Food Eng.* 2007;78(4):1291–7.
28. Kaya A, Aydın O, Demirtaş C. Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination.* 2009;237(1):285–95.
29. Babalis SJ, Belessiotis VG. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *J Food Eng.* 2004;65(3):449–58.
30. Kafler LM, Comério L, Dal-Bó V, Lira TS, Arrieche LS. Secagem da casca do café como etapa prévia à geração de energia. En: *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química*; 29 de Set 2016. Fortaleza, Brasil; 2016.
31. Srikiatden J, Roberts JS. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *J Food Eng.* 2006;74(1):143–52.
32. Akpınar EK. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J Food Eng.* 2006;73(1):75–84.
33. Hossain MA, Bala BK. Thin-layer drying characteristics for green chilli. *Dry Technol.* 2002;20(2):489–505.

34. Yaldız O, Ertekın C. Thin layer solar drying of some vegetables. *Dry Technol.* 2001;19(3–4):583–97.
35. Sawhney RL, Pangavhane DR, Sarsavadia PN. Drying Kinetics of single layer thompson seedless grapes under heated ambient air conditions. *Dry Technol.* 1999;17(1–2):215–36.
36. Erenturk S, Erenturk K. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. *J Food Eng.* 2007;78(3):905–12.
37. Akpınar EK, Sarsılmaz C, Yıldız C. Mathematical modelling of a thin layer drying of apricots in a solar energized rotary dryer. *Int J Energy Res.* 2004;28(8):739–52.
38. Menges HO, Ertekin C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *J Food Eng.* 2006;77(1):119–25.
39. Lewis WK. The Rate of Drying of Solid Materials. *J Ind Eng Chem.* 1921;13(5):427–32.
40. Page GE. Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers [master's thesis]. West Lafayette (IN): Purdue University; 1949.
41. Henderson SM, Pabis S. Grain Drying Theory I: Temperature Effect on Drying Coefficient. *J Agric Eng Res.* 1961;6(3):169–74.

42. Yagcioglu AK, Degirmencioglu A, Cagatay F. Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions. En: 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy. Adana, Turkia; 1999. p. 565–9.
43. Henderson SM. Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. En: Transactions of the ASAE. 1974. p. 1167–72.
44. Sharaf-Eldeen YI, Blaisdell JL, Hamdy MY. A Model for Ear Corn Drying. Vol. 23. St. Joseph (MI): ASABE; 1980.
45. Yaldiz O, Erketin C, Uzun H. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 2001;26(5):457–65.
46. Karathanos VT. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *J Food Eng*. 1999;39(4):337–44.
47. Thompson TL, Foster RMP and GH. Mathematical Simulation of Corn Drying — A New Model. *Trans ASAE*. 1968;11(4).
48. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single layer drying. *Dry Technol*. 2002;20(7):1503–13.
49. Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. 2da ed. Uxbridge: Oxford University Press; 1975.
50. Whitaker S. Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. *Adv Heat Transf*. 1977;13(C):119–203.

51. Vasić M, Radojević Z, Grbavčić Ž. Calculation of the effective diffusion coefficient during the drying of clay samples. *J Serb Chem Soc.* 2012;7772(66).
52. Ketelaars AAJ, Pel L, Coumans WJ, Kerkhof PJAM. Drying kinetics: A comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves. *Chem Eng Sci.* 1995;50(7):1187–91.
53. Cavalcanti R da S, Farias Neto SR de, Vilar EO. A computational fluid dynamics study of hydrogen bubbles in an electrochemical reactor. *Brazilian Arch Biol Technol.* 2005;48(spe):219–29.
54. Shi S. Diffusion model based on Fick's second law for the moisture absorption process in wood fiber-based composites: is it suitable or not? *Wood Sci Technol.* 2007;41(8):645–58.
55. Silberberg MS. *Chemistry: the molecular nature of matter and change.* 6th ed. Las Vegas (NV): McGraw-Hill; 2012.
56. Geankoplis C. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.* 3ra ed. Méjico: Editorial Continental; 1998.
57. Corrêa PC, Resende O, Menezes Ribeiro D. Drying Characteristics and Kinetics of Coffee Berry. *Rev Bras Prod Agroindustriais.* 2006;8(1):1–10.
58. Panagiotou NM, Krokida MK, Maroulis ZB, Saravacos GD. Moisture

Diffusivity: Literature Data Compilation for Foodstuffs. *Int J Food Prop.* 2004;7(2):273–99.

59. Zogzas NP, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Dry Technol.* 1996;14(10):2225–53.