

Modelado del secado en capa fina y del presecado al sol a diferentes alturas de capa de la *Lemna obscura* del lago de Maracaibo

Leobaldo Suárez¹, Alexis Faneite^{2*} y Alexis Ferrer³

¹Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Rafael Urdaneta.
Avenida el Milagro, Vereda del Lago, Maracaibo, Venezuela

²Laboratorio de Ingeniería Química “Prof. Ydelfonso Arrieta”, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Avenida Goajira, Campus “Dr. Antonio Borjas Romero”, Sector Grano de Oro, Maracaibo, Venezuela

³Unidad de Tecnología Agroalimentaria, Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas. Km. 15 vía La Cañada de Urdaneta, La Cañada de Urdaneta, Venezuela

*Correo del autor de correspondencia: afaneite@fing.luz.edu.ve

Recibido: 16-11-2012 Aceptado: 17-05-2013

Resumen

El propósito de esta investigación fue estudiar y modelar la cinética de secado en una estufa de convección forzada por aire caliente, de la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo, a diferentes temperaturas (55, 75, 95 y 115°C) y diferentes espesores de capa (4, 5 y 6 mm), así como estudiar la cinética del presecado al sol con espesores de capa de 5 y 10 mm y determinar si disminuía la concentración de proteína cruda durante el proceso de secado solar. Se encontró que el tiempo de secado varía con la temperatura y que la relación de humedad disminuye monotónicamente en función del tiempo. Adicionalmente se determinó que los espesores de capa de 5 y 6 mm de muestra secada en la estufa, así como el espesor de 10 mm en el presecado al sol, no se ajustan a la definición de capa fina. Las curvas de secado se modelaron empíricamente con las ecuaciones para secado en capa fina más usadas, obteniéndose como resultado que los modelos Midilli y Hii, fueron los que mejor representaron el comportamiento cinético de los datos experimentales para el secado en la estufa y para el secado al sol. El secado de la *Lemna obscura* no sigue la Solución de Crank a la segunda Ley de Fick ya que la difusividad efectiva no es independiente de la humedad.

Palabras clave: *Lemna obscura*, cinética de secado, secado a distintos espesores de capa, presecado al sol, difusividad efectiva.

Modeling of the thin layer drying and solar drying at different layer thickness of the *Lemna obscura* from Maracaibo lake

Abstract

The purpose of this investigation was to study and model the drying kinetics of the *Lemna obscura* from Maracaibo Lake in a forced convection oven by hot air, at different temperatures (55, 75, 95 and 115°C) and different layer thicknesses (4, 5 and 6 mm), and study the solar pre drying kinetics with a thickness layer of 5 and 10 mm, also to determine if crude protein decreases during the solar predrying. It was found that the drying time varied according to the temperature, and that the moisture ratio monotonically decreases as a function of time. Additionally, it was determined that the layer thickness of 5 and 6 mm for the oven drying, and also the 10 mm thickness for the solar pre drying, do not follow the definition of thin layer. The drying curves were empirically modeled with the most commonly thin layer drying equations. The results showed that the Midilli and Hii models were the best which represented the kinetics behavior of the experimental data, for both the oven drying and the solar pre drying. The drying of *Lemna obscura* does not follow the Crank's solution to Fick's Second Law since the effective diffusivity depends upon the moisture.

Key words: *Lemna obscura*, drying kinetics, drying at different layer thicknesses, solar predrying, effective diffusivity.

Introducción

En el año 2004, el Lago de Maracaibo se cubrió de verde por el crecimiento masivo de una especie de planta acuática posteriormente denominada como *Lemna obscura* [1]. El afloramiento de esta planta empezó en la región central de la cuenca del lago, migrando posteriormente por acción de los vientos y las corrientes lacustres hacia el estrecho de Maracaibo. Este elevado crecimiento de biomasa logró cubrir cerca del 20% del espejo lacustre y ha estado oscilando desde entonces con una tendencia a disminuir [2].

El secado a distintos espesores de capa, implica la medición de la pérdida de peso en función del tiempo para un material determinado, el cual es preparado en bandejas en forma de una capa con espesor variable, a unas condiciones de velocidad lineal, humedad relativa y temperatura del aire constantes [3], mientras que el presecado al sol implica la misma preparación del material expuesta anteriormente, con la diferencia de que las muestras son colocadas a la intemperie por un periodo de tiempo definido, mientras se toman a su vez los parámetros ambientales en tiempo real (temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y radiación solar). A través de este estudio se obtienen los datos necesarios para generar gráficos donde se representa la variación de la humedad en función del tiempo (curvas de secado)[4].

Los objetivos planteados en este estudio fueron los de determinar el modelo de secado en capa fina que mejor se ajusta a la cinética de secado de la *lemna* del Lago de Maracaibo, así como también del modelo que mejor se ajusta al presecado al sol, seleccionando dichos modelos con criterios estadísticos, gráficos y analíticos. Correlacionar los parámetros del modelo seleccionado con las condiciones de secado, y determinar degradación de la proteína durante el presecado al sol.

Materiales y Métodos

Materiales

Se utilizó *Lemna obscura*, la cual se recolectó a 20 km al norte de Ciudad Ojeda en una cañada al costado de la carretera, Estado Zulia, Venezuela; la misma se lavó con abundante agua desinfectada con cloro para eliminarle microorganismos patógenos y luego se almacenó en bolsas plásticas selladas en el refrigerador a 2 °C, hasta su posterior empleo [3].

Métodos

Medición experimental de la cinética de secado a distintos espesores de capa

Las muestras refrigeradas a 2 °C, se atemperaron hasta temperatura ambiente. Se estableció la temperatura deseada en el horno de convección forzada (55, 75, 95, 115 °C) con precisión de ± 1 °C, constatando el estado estacionario mediante el monitoreo de la temperatura cada 10 minutos por 1 h [6]. Se pesaron en la balanza analítica las muestras por triplicado [3], en portamuestras de aluminio, de 1 cm de altura, 12 de largo y 6 de ancho, con un espesor de capa de 4, 5 y 6 mm; cada espesor de capa se preparó por triplicado y la altura de capa se determinó con un vernier de precisión 0,01 mm. Luego se introdujeron los portamuestras en el horno de convección forzada y se empieza a tomar cada 5 min la temperatura del horno y la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del ambiente, mientras la muestra esté dentro del horno. Las muestras se sacaban del horno cada 5 minutos para las curvas realizadas a las temperaturas de 55 y 75 °C y cada 3 minutos para las curvas realizadas a las temperaturas de 95 y 115 °C, para obtener la mayor cantidad posible de puntos al momento de graficar, donde son pesadas rápidamente en la balanza analítica [6]. Una vez pesadas las muestras se volvían a introducir en el horno de convección forzada. Estos pasos se repitieron hasta observar una variación en el orden de 10^{-4} por 15 minutos, ésto se estableció como criterio para considerar que las muestras llegaban a peso constante [5]. El tiempo de pesada no se tomó en cuenta para la cinética de secado. Después de comprobar la condición anterior las muestras se introdujeron en el horno de convección natural y se mantuvieron allí por 24 horas [6]. Finalmente se retiraron las muestras del desecador y se atemperaban hasta alcanzar la temperatura ambiente, para posteriormente pesarlas y obtener la masa final. Se determinó la humedad en base seca (bs) (kg agua/kg sólido seco), denotada con “X”. Luego se calculó la relación de humedad “Mr” en el tiempo, dividiendo la humedad en los distintos tiempos entre la humedad inicial. Finalmente se graficaron las Mr en función del tiempo “t”.

Modelado empírico

Las curvas de secado de Mr en función de t, se suavizaron con polinomios de orden n, y los polinomios se modelaron con las ecuaciones de la Tabla 1, usando el método de los mínimos cuadrados [7] y el “Solver de Excel” para hallar los parámetros de las ecuaciones de secado en capa fina de dicha tabla. Los polinomios permitieron utilizar lapsos de 10 segundos en vez de 5 y 3 minutos para garantizar la suavidad de dichos modelos. Luego se graficaron las curvas de secado experimentales con la representación de los modelos, para hacer una inspección visual.

Tabla 1. Ecuaciones semi-teóricas y empíricas del secado en capa fina

N.	Nombre	Ecuación	Referencia
(1)	Page	$M_R(t) = \exp(-kt^n)$	Page (1949) [8].
(2)	Midilli	$M_R(t) = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002) [9].
(3)	Hii	$M_R(t) = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$	Hii et al. (2009) [10].
(4)	Verma	$M_R(t) = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Verma et al. (1985) [11].

N.: Número de la ecuación. t: Tiempo; Mr(t): Relación de humedad; a, b, c, , k, y n parámetros y constantes de las ecuaciones.

Se graficaron los residuales (R) de Mr(t) para los modelos de la Tabla 1, en función de los Mr(t) experimentales, para verificar si presentaban sesgo y aleatoriedad. En términos analíticos, se utilizaron los siguientes criterios estadísticos: R²: Coeficiente de determinación; MBE: Error promedio sesgado; MRD: Desviación relativa promedio; RMSE: Raíz del promedio del error cuadrado y χ^2 : Ji cuadrado, con lo cual se seleccionaron los modelos matemáticos que mejor se ajustaron a los datos experimentales. Finalmente se promediaron en una prueba ANOVA y LSD con 95% de confianza, utilizando el programa Statistix®, para verificar si existían diferencias significativas entre los modelos.

Presecado al sol de la *Lemna obscura* con espesores de capa de 5 y 10 mm

Medición experimental del presecado al sol a distintos espesores de capa

Las muestras refrigeradas a 2 °C, se atemperaron hasta temperatura ambiente. Se pesaron las muestras por duplicado en 16 portamuestras de aluminio, de 1 cm de altura, 12 cm de largo y 6 cm de ancho, en la balanza analítica, con un espesor de capa de 5 y 10 mm. La altura de capa se determinó con un vernier de precisión 0.01 mm [7]. El estudio se realizó con repeticiones diarias durante 5 días, el periodo de secado para los días del ensayo estuvo comprendido entre las 10:00 am y las 2:00pm. Luego se colocaron sobre el suelo los 16 portamuestras alineados en filas, cuidando que no tuvieran ninguna barrera física cercana, que las privara de la exposición a las condiciones ambientales, y fijadas al suelo para asegurar su permanencia en el sitio usando clavos de acero. Los portamuestras se colocaron al sol durante 4 horas y se retiraron dos unidades cada 30 min para cada espesor de capa, los cuales se almacenaron en bolsas tipo ziploc dentro de una cava para conservar la humedad del momento en el que fueron retiradas del sitio. A las muestras se les determinó % N, para estimar si hubo cambios en el contenido de proteína cruda durante el presecado. Posteriormente las muestras se llevaron al laboratorio, donde se les determinó la humedad a 105 °C por 4 h, y luego cada 30 min hasta peso constante.

Modelaje con el método de régimen regular

Usando la Solución de Crank a la segunda Ley de Fick, se calculó para cada punto experimental la difusividad efectiva y se correlacionó en función de Mr [7].

Resultados y Discusión

Caracterización de la *Lemna obscura*

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la humedad y la proteína cruda de la *Lemna obscura* para este trabajo y uno anterior en donde se observan diferencias apreciables solo en el contenido de proteína cruda. Se ha reportado que esta variable depende principalmente del contenido de nitrógeno del medio, además de otros nutrientes y de la estación, localidad, edad y tratamiento posterior a su recolección. De acuerdo a la Tabla 2 se deduce que la lemna recolectada para este trabajo corresponde a una planta joven que se desarrolló en un entorno con una óptima disponibilidad de nutrientes y unas condiciones ambientales propicias. Su elevada humedad implica la necesidad de secarla en caso de su utilización a gran escala. Su contenido de grasa la hace atractiva para su extracción y posterior uso por ejemplo como materia prima para producción de biodiesel. Dado el alto contenido proteico, se pueden elaborar concentrados proteicos de elevada calidad para alimentación de animales.

Tabla 2. Análisis químico de la lemna

Muestras	%x ₀	% PC	% g
Araujo y Villalobos, 2009	94.88 ± 0,01	24.79 ± 1,20	8.5 ± 0,5
Este trabajo	95.73 ± 0,03	31.06 ± 0,98	8.8 ± 0,7

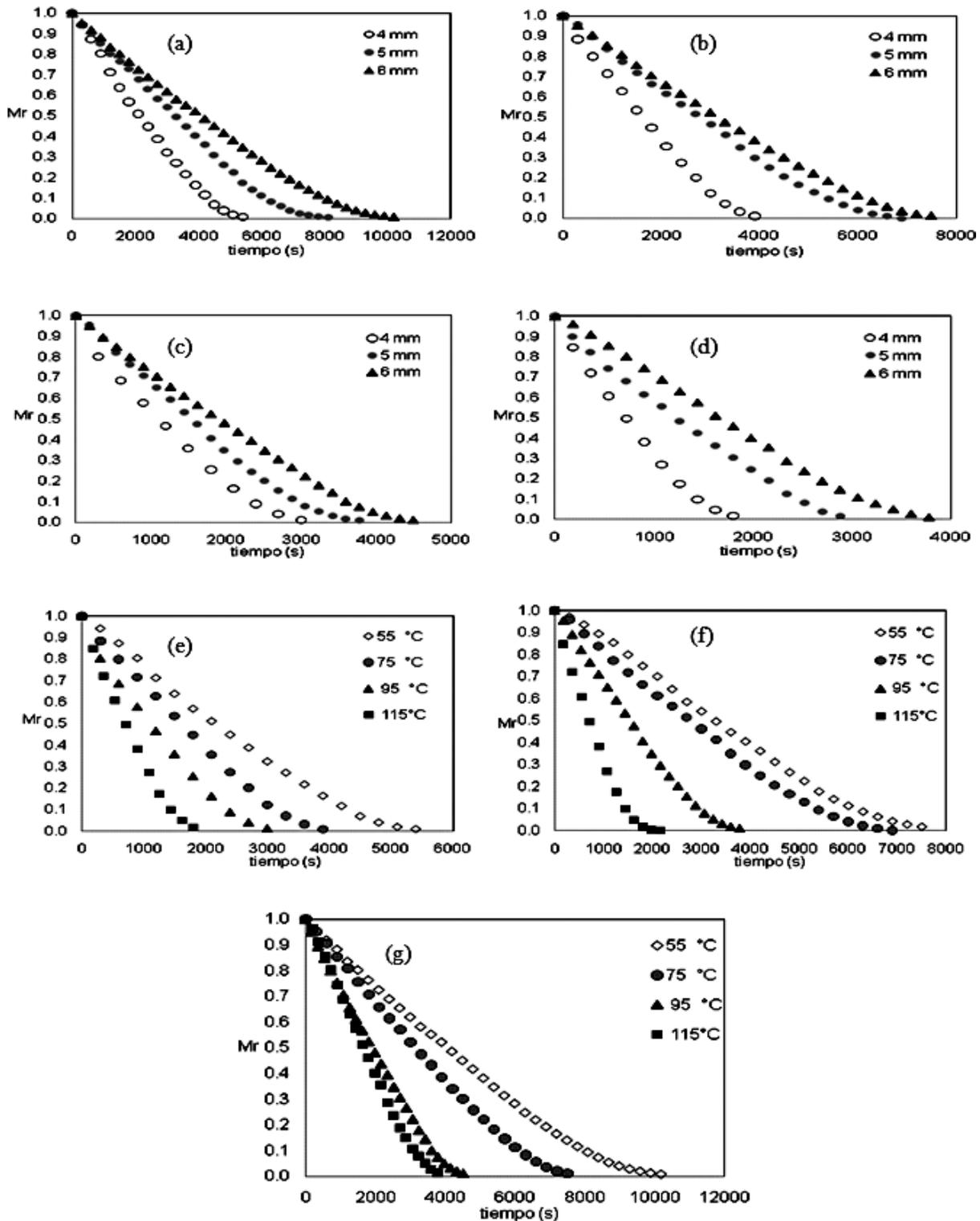
*Resultados en base seca. X₀: porcentaje de humedad, PC: proteína cruda, g: grasa el signo ± representa la desviación estándar

Cinética de secado para la *Lemna obscura* a distintas temperaturas y espesores de capa

En las Figuras 1a, 1b, 1c y 1d se muestran las curvas de secado de la *Lemna obscura* en términos de relación de humedad en función del tiempo a 55, 75, 95 y 115 °C, respectivamente, a los espesores de capa de 4, 5 y 6 mm y, en las Figuras 1e, 1f y 1g se muestran las mismas curvas de secado pero agrupadas por altura de capa (a 4, 5 y 6 mm, respectivamente), a las temperaturas de 55, 75, 95 y 115 C°, en donde se observa que para todas las temperaturas, la relación de humedad disminuye monotónicamente en función del tiempo, llegando hasta un punto en donde la pérdida de peso se hace notablemente lenta, muy por debajo de la humedad final deseada de almacenaje (<10%, bh) y se considera que las muestras alcanzan un peso constante, por lo cual, los valores a partir de este punto se descartan [7].

En términos de altura de capa se establece que a mayor espesor de la misma, el material se seca más lentamente, hecho que se observa en las Figuras 1e, 1f y 1g. Se ha demostrado que los materiales lignocelulósicos en general tienen un secado con control interno [7]. Para alturas de capa por encima de los 4 mm se crean capas externas secas que se convierten en barreras a la transferencia de calor logrando que las capas internas con mayor humedad se sequen a una velocidad menor, con lo que se puede decir que la altura de capa de 4 mm es la que mejor se ajusta a la definición del secado en capa fina.

Figura 1. Curvas de secado experimentales para la *Lemna obscura* donde (a) es 55°C, (b) es 75°C, (c) es 95 °C y d) es 115°C, mientras que (e), (f) y (g), representan espesores de capa de 4, 5 y 6 mm, respectivamente

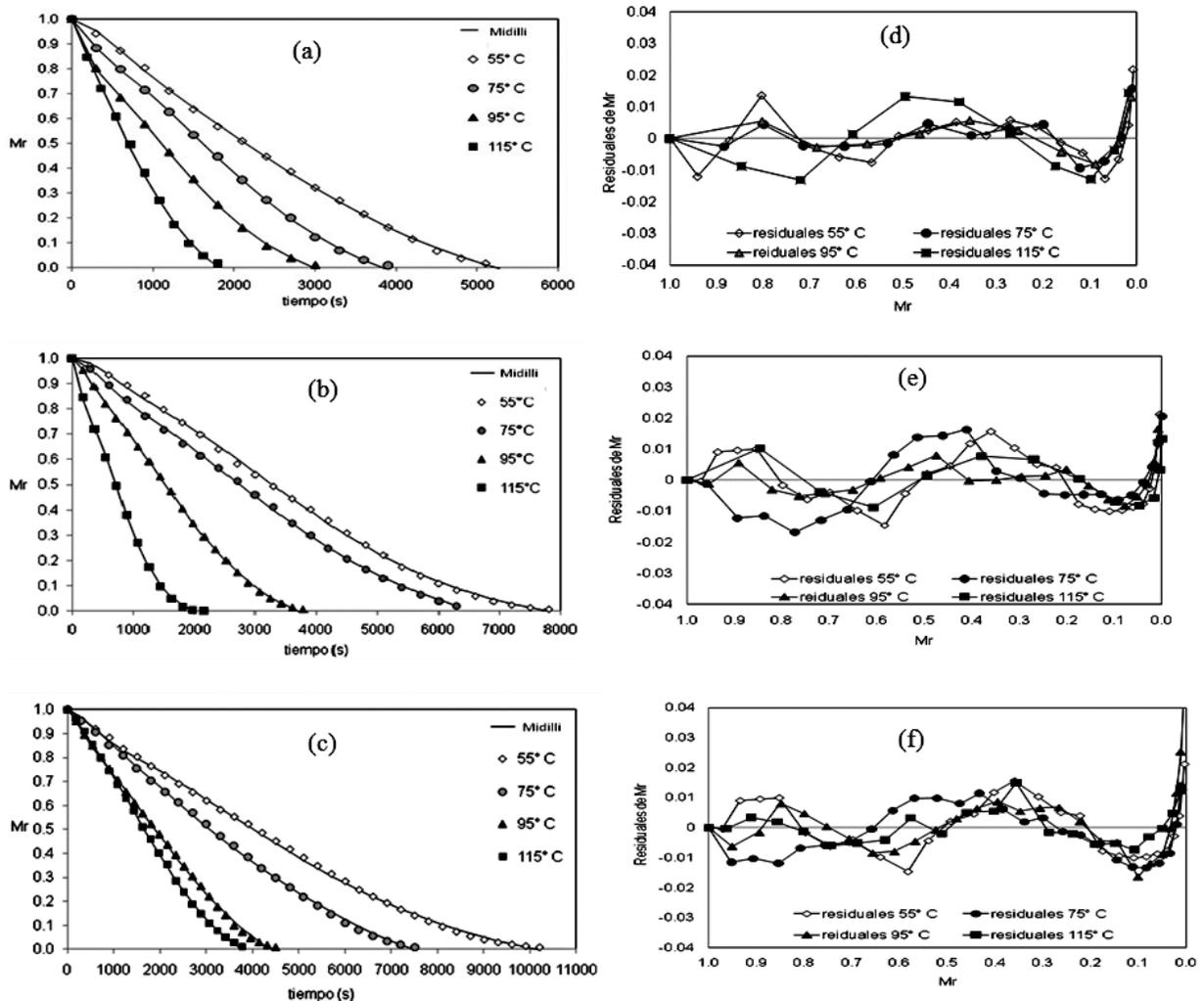


Modelado empírico de la *Lemna obscura*

Las curvas de secado obtenidas fueron ajustadas con los modelos más usados hasta ahora (Tabla 1). Luego de una inspección visual y la comparación de los cinco criterios estadísticos tomados en cuenta para seleccionar el mejor modelo, se podría considerar que el modelo de Midilli es el que mejor se ajusta al comportamiento cinético de la *lemna*.

En las Figuras 2 a, b, y c, se muestran las curvas de secado para la *Lemna obscura* a 4, 5 y 6 mm de altura de capa, respectivamente, en términos de los datos experimentales y el modelo que mejor se ajusta al comportamiento experimental, el cual fue el de Midilli. Se observa también en los residuales, un sesgo bastante bajo de $\pm 0,02$ de relación de humedad, y una buena aleatoriedad. Los demás modelos evaluados tuvieron un comportamiento similar, por lo que la selección final se llevó a cabo mediante los criterios analíticos.

Figura 2. Curvas del modelo que mejor siguió los parámetros experimentales (a, b y c) y Residuales (d, e y f) para la *Lemna obscura* a 4, 5, y 6 mm de espesor de capa



En las Tablas 3, 4 y 5 se presentan los criterios de selección analíticos de tendencia (R^2), distribución de los puntos alrededor del modelo (MBE y MRD) y sesgo (RMSE y χ^2) para los modelos evaluados a 4, 5 y 6 mm, respectivamente, conjuntamente con el resultado del ANOVA y la prueba LSD con 95% de confianza. Para todos los criterios evaluados, se encontraron diferencias significativas entre los modelos ($P < 0,05$).

Tabla 3. Criterios estadísticos de selección para una altura de capa de 4 mm.

MODELO	R^2	MBE	MRD	RMSE	χ^2
PAGE	0,9900 ^c	-1,02E-03 ^d	-0,4779 ^d	0,0323 ^a	1,26E-04 ^a
MIDILLI	0,9978 ^{ab}	7,42E-03 ^a	0,2358 ^a	0,0146 ^{bc}	3,40E-04 ^{bc}
HII	0,9985 ^{ab}	-2,68E-04 ^c	-0,1972 ^b	0,0124 ^c	2,54E-04 ^{bc}
VERMA	0,9971 ^b	2,16E-04 ^a	0,2841 ^a	0,0171 ^b	3,83E-04 ^b

Tabla 4. Criterios estadísticos de selección para una altura de capa de 5 mm.

MODELO	R^2	MBE	MRD	RMSE	χ^2
PAGE	0,9937 ^b	1,04E-02 ^d	-0,9949 ^c	0,0287 ^a	9,26E-04 ^a
MIDILLI	0,998 ^a	-9,49E-05 ^b	1,0659 ^{ab}	0,0153 ^b	3,27E-04 ^b
HII	0,999 ^a	-2,97E-04 ^c	-0,2761 ^{bc}	0,0115 ^{bc}	1,90E-04 ^b
VERMA	0,994 ^b	6,59E-04 ^a	1,8488 ^a	0,0282 ^a	1,02E-05 ^a

Tabla 5. Criterios estadísticos de selección para una altura de capa de 6 mm.

MODELO	R^2	MBE	MRD	RMSE	χ^2
PAGE	0,9931 ^b	1,11E-02 ^d	-0,7721 ^c	0,0269 ^a	9,26E-04 ^a
MIDILLI	0,998 ^a	9,19E-04 ^b	0,6805 ^{ab}	0,0152 ^b	3,09E-04 ^b
HII	0,9981 ^a	-3,53E-03 ^c	0,4379 ^c	0,0152 ^b	3,00E-04 ^b
VERMA	0,9941 ^b	7,61E-03 ^a	-0,1445 ^a	0,0283 ^a	9,98E-04 ^a

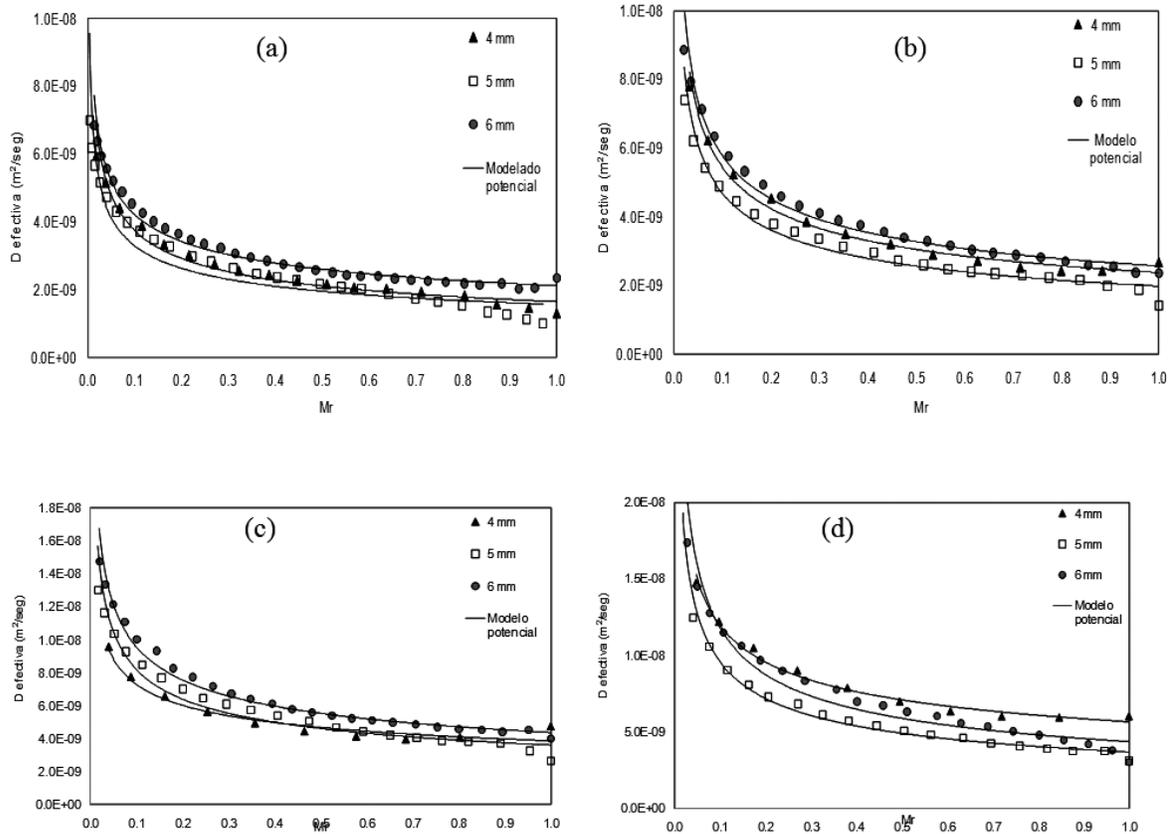
R^2 : Coeficiente de determinación, MBE: Error promedio sesgado, MRD: Desviación relativa promedio, RMSE: Raíz del promedio del error cuadrado, χ^2 : Ji cuadrado. Superíndices a, b y c representan grupos de valores sin diferencias significativas en la prueba LSD (95% confianza)

Los modelos de Hii y Midilli, son los que tienen la mejor tendencia comparados con Page y Verma. El modelo de Midilli a su vez, es el que presentó una mejor distribución de los datos experimentales equitativamente alrededor de él, ya que los residuales de Mr tienen menor oscilación alrededor del 0. Los modelos de Midilli y Hii no presentaron diferencias significativas en cuanto al sesgo ($P > 0,05$), en donde fueron los mejores en relación a la tendencia de los estadísticos RMSE y χ^2 a 0.

Los parámetros de los modelos de Midilli y Hii no presentaron una correlación clara con la temperatura, por lo que se descartan para trabajos de simulación del secado de la lemna, por lo que se usará un modelo de base teórica, para reportar una ecuación que permita la simulación y diseño de secadores, el cual es el método de régimen regular.

En las Figuras 3 a, b, c y d se muestran las difusividades efectivas en función de la humedad (expresada en términos de Mr) para las muestras de la *Lemna obscura* con espesores de capa de 4, 5 y 6 mm a 55, 75, 95 y 115 °C, respectivamente.

Figura 3a, b, c y d. Curvas de Difusividad efectiva en relación a Mr para temperaturas de 55, 75, 95 y 115°C, respectivamente



Se observa un comportamiento potencial en todos los casos, lo que demuestra que el secado de la *Lemna obscura* y demás materiales lignocelulósicos no sigue la Solución de Crank a la segunda Ley de Fick, es decir, la difusividad efectiva no es independiente de la humedad y por lo tanto obedece a un fenómeno difusional no fickciano, tal como lo afirma Faneite (2010), para este tipo de materiales [7], lo que puede ser descrito por el método del régimen regular, a través de la siguiente ecuación:

$$D_{efectiva} = (-1,60E-08 + 5,34E-11 * T) * (Mr)^{-0,3533} (5)$$

Los parámetros de la ecuación resultante están en el mismo orden que los reportados por Faneite [7], para otros materiales lignocelulósicos. La diferencia que se encuentra podría deberse a que los datos utilizados en el estudio de Faneite (2010) provienen de Araujo y Villalobos [12], que usaron un espesor de capa inferior (2 mm), siendo los parámetros de este trabajo el resultado de promediar las curvas de difusividad de las tres alturas de capa, ya que no se encontró diferencia apreciable para las curvas de cada temperatura, tal como se observa en la Figura 3.

Parámetros ambientales del presecado al sol

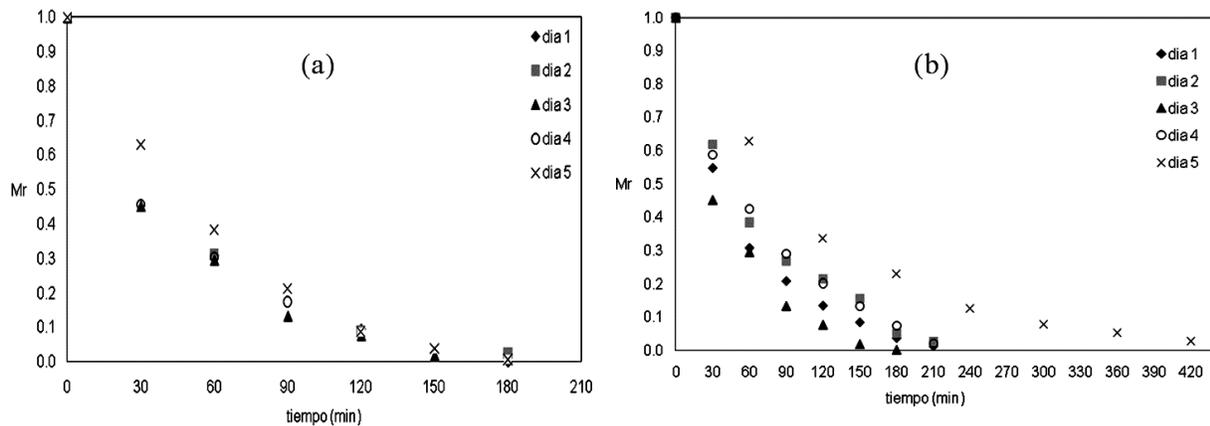
Se midieron las condiciones meteorológicas en términos de temperatura ambiental, % de humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, respectivamente. Para la temperatura ambiental y la humedad relativa, no se observaron diferencias apreciables por hora en los días de estudio, con temperaturas en un rango de 31,3 a 36 °C y humedades con rangos entre 59 y 80 %, respectivamente. Para la velocidad del viento se observaron velocidades máximas de 7,70 y mínimas de 2,5 m/seg. En términos de radiación solar se observaron valores máximos y mínimos de 73 y 2,44 cal/cm² x min, respectivamente.

Cinética de secado de la *Lemna obscura* presecada al sol a distintos espesores decapa

En las Figuras 4 a y b, se muestran las curvas de secado de la *Lemna obscura* presecada al sol, a espesores de capa de 5 y 10 mm, respectivamente, en donde se observa que para todos los días, la relación de humedad disminuye monótonicamente en función del tiempo para ambos espesores de capa, Este comportamiento es similar al observado en la Figura 1 y otros estudios tales como los reportados por Faneite [7] y Araujo y Villalobos [12].

En la Figura 4 b, se observan las curvas de secado para la *Lemna obscura* con un espesor de capa de 10 mm, en donde se evidencia que al aumentar el espesor de la capa, una de las curvas que estaba solapada se separa y esto se debe a que éste fue el día, donde se reportó la menor temperatura ambiente promedio en relación al resto. Experimentalmente, se observó la formación de una capa superior más seca que impide que la radiación solar penetre en los estratos inferiores del material.

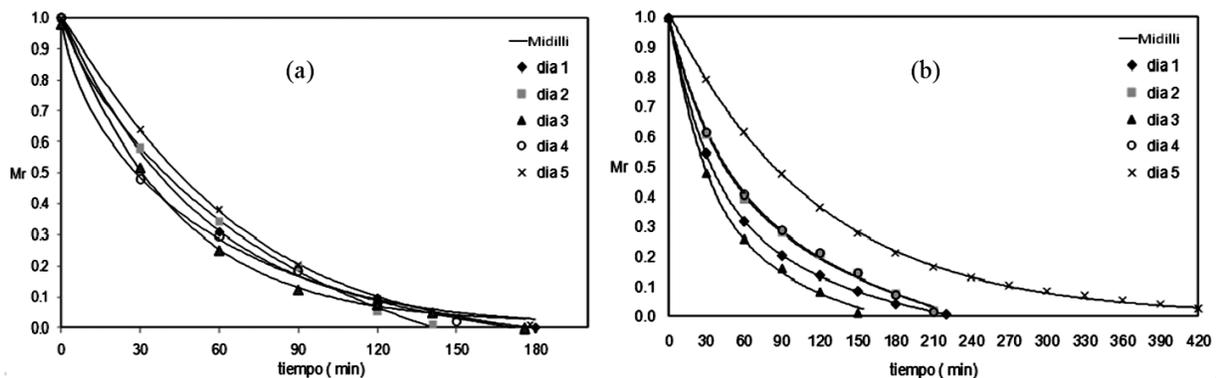
Figura. 4 Curvas experimentales del presecado al sol para la *Lemna obscura* con un espesor de capa de (a) 5 mm y (b) 10 mm



Modelado empírico de la cinética de secado de la *Lemna obscura* presecada al sol a distintos espesores de capa

En las Figuras 5 a y b, se muestran las curvas de secado para la *Lemna obscura* a 5 y 10 mm de espesor de capa, respectivamente, donde se observa a su vez, el excelente ajuste del modelo al comportamiento experimental, el cual no tuvo diferencias apreciables entre Midilli y Hii.

Figura 5 a y b. Curvas del modelo que mejor siguió los parámetros experimentales para la *Lemna obscura* a (a) 5 mm y 10 mm de espesor de capa



En términos analíticos, los modelos de Midilli y Hii, fueron los que mejores resultados tuvieron en todos los criterios estadísticos, lo cual se puede observar en la Tabla 6 para 5 y 10 mm de espesor de capa. No se obtuvo una correlación clara de los parámetros de Midilli ni de Hii con las condiciones ambientales, por lo que no pueden ser usados como herramienta de diseño y ésto se atribuye a su base mucho más empírica que teórica.

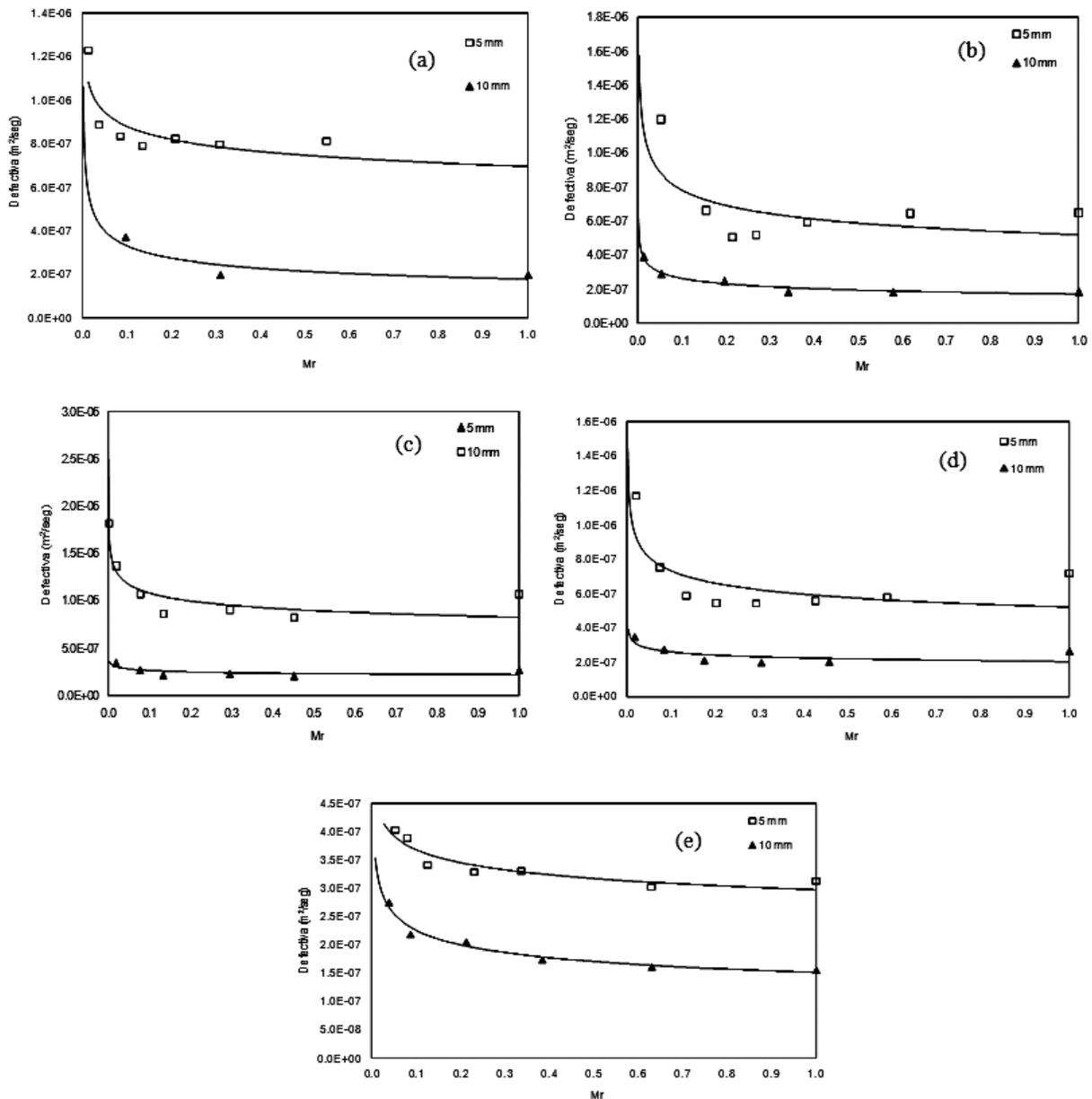
Tabla 6. Criterios estadísticos para el presecado al sol

MODELO	R2	MBE	MRD	RMSE
<i>5 mm de espesor de capa</i>				
MIDILLI	0,9985	1,01E-03	0,5226	0,0142
HII	0,9979	-4,42E-03	-0,1334	0,0167
<i>10 mm de espesor de capa</i>				
MIDILLI	0,9266	2,34E-02	-6,6939	0,0166
HII	0,9264	-2,30E-02	-3,8012	0,0199

R²: Coeficiente de determinación, MBE: Error promedio sesgado, MRD: Desviación relativa promedio, RMSE: Raíz promedio del error cuadrado

En las Figuras 6 a, b, c, d y e, se muestran las difusividades efectivas en función de la humedad (expresada en términos de M_r) para las muestras de la *Lemna obscura* presecada al sol, para espesores de capa de 5 y 10 mm, respectivamente. Se observa un comportamiento potencial en todos los casos [6], que concuerda con lo establecido anteriormente para la cinética de secado a distintos espesores de capa y en otros trabajos hecho que ratifica que el secado de los materiales lignocelulósicos no sigue la Solución de Crank a la segunda Ley de Fick. A diferencia del secado en capa fina, en estufa, en donde la difusividad efectiva es independiente de la temperatura, se observa que, para un espesor de capa de 10 mm, la lemna aparenta ser otro material, ya que teóricamente la difusividad depende del material y de su humedad. Esto se debe a que en los periodos iniciales de secado, se forma un estrato superficial que, por estar directamente expuesto a los elementos (radiación solar y velocidad del viento), se convierte en una barrera a la transferencia de calor hacia el interior de la capa, quedando el resto de la lemna, por debajo de este estrato, a merced solo de la temperatura ambiente como fuerza impulsora del secado. Este fenómeno implica una difusión de la humedad más pobre en la capa de 10 mm que en la de 5 mm.

Figura 6 a, b, c, d y e. Curvas de Difusividad efectiva en relación a M_r de la *Lemna obscura* presecada al sol correspondiente a los días 1,2,3,4 y 5. La línea continua representa el modelo de régimen regular



Conclusiones

Las curvas de secado de la *lemna* presentan un decrecimiento monótonico de la humedad en función del tiempo, seguido de una etapa de secado extremadamente lenta que no se toma en cuenta en la cinética, por comenzar en una humedad muy por debajo de la humedad estimada de almacenaje. La velocidad de secado aumenta en función de la temperatura.

Los modelos que más se ajustan a la cinética de secado de la *Lemna obscura* son Midilli y Hii, sin embargo, los parámetros hallados en este trabajo, no tuvieron una clara correlación con las distintas condiciones de secado utilizadas.

La difusividad efectiva del agua en función de la humedad durante el proceso de secado de la *Lemna* no es constante, y tiene un comportamiento potencial, por lo que el fenómeno difusional es no fíckiano. La difusividad efectiva es independiente para los espesores de capa estudiados, a excepción de la cinética del presecado al sol, por encima de 10 mm de espesor de capa.

Referencias bibliográficas

1. Medina E., Barboza F., Francisco M. y Sánchez J., Biomasa y composición mineral de comunidades de *Lemna obscura* (Austin Daubs) en el Lago de Maracaibo, *Ciencia*, Vol. 14 (Número Especial), (2006), 32–41.
2. Herrera L., Informe de la Comisión Especial de la Universidad del Zulia Designada para el Estudio de Afloramiento Masivo de *Lemna sp.* en el Lago de Maracaibo, Maracaibo, Venezuela, (2004), 8 p.
3. Doymaz I., Tugrul N. and Pala M., Drying characteristics of dill and parsley leaves, *J. Food Eng.*, Vol. 77, (2006), 559–565.
4. Abdelghani B., Hocine B. and Djamel M., Solar drying kinetics of date palm fruit assuming a step-wise air temperature change, *J. Eng. Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 3, (2009), 292-304.
5. Arabhosseini A., Huisman W., Van Boxtel A. and Müller J., Modeling of thin layer drying of tarragon (*Artemisia dracuncululus* L.), *Ind. Crops Prod.*, Vol. 29, (2008), 53-59.
6. Panchariya P., Popovic D. and Sharma A., Thin-layer modelling of black tea drying process, *J. Food Eng.*, Vol. 52, (2002), 349–357.
7. Faneite A., Cinética del Secado de Materiales Lignocelulósicos Tratados y No Tratados con Presurización y Despresurización Amoniaca (PDA), Trabajo de Grado, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, División de Postgrado, Maracaibo, Venezuela, (2010), 174 p.
8. Page G., Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA, (1949).
9. Midilli A., Kucuk H. and Yapar Z., A new model for single-layer drying, *Drying Technol.*, Vol. 20, No. 7, (2002), 1503–1513.
10. Hii C., Law C. and Cloke M., Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa, *J. Food Eng.*, Vol. 90, (2009), 191–198.
11. Verma L.R., Bucklin R.A., Endan J.B. and Wratten F., Effects of drying air parameters on rice drying models, *Trans. ASAE*, Vol. 28, (1985), 296–301.
12. Araujo S. y Villalobos L., Modelado del Proceso de Secado en Capa Fina de la *Lemna obscura* del Lago de Maracaibo. Trabajo de grado, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Maracaibo, Venezuela, (2009), 174 p.