

**CONDICIONES DE SECADO DEL CILANTRO CIMARRÓN (*Eryngium foetidum*)
APLICANDO MODELOS CINÉTICOS**

**(*DRYING CONDITIONS OF THE CIMARRÓN CILANTRO (Eryngium foetidum)*
APPLYING KINETIC MODELS)**

Yesenia Cruz, Jordy Gámez

Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora” UNELLEZ. Programa Ciencias del Agro y del Mar. San Carlos-Estado Cojedes, Venezuela.

yeseniacruzalvarez2706@gmail.com / jordyjavier@hotmail.com

Recibido: 17-02-2019/ Aceptado: 20-04-2018

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue encontrar un modelo matemático que permitiera determinar las condiciones de secado del Cilantro Cimarrón (*Eryngium foetidum*) a diferentes temperaturas. En un secador de bandejas perforadas, en el laboratorio, se llevaron a cabo las pruebas de secado a temperaturas de 40, 50 y 60 °C, con una velocidad de aire constante de 7 m/s. Para el análisis de las curvas de secado se utilizaron dos modelos: Lineal y el de Fornell. La humedad en estado fresco del Cilantro Cimarrón fue 84,70% ±0,92 y la humedad de equilibrio encontrada fue de 0,05 (g de agua /g ss) correspondientemente a la temperatura de 50°C, equivalentes a una reducción de humedad de 79,4 % de su contenido inicial. En este vegetal se observó un periodo decreciente en la mayor parte del proceso de secado para los tres tratamientos. La predicción del modelo de Fornell presentó mejores ajustes (valores de R² superior a 0,99) en las curvas de secado del cilantro cimarrón. La temperatura de secado óptima fue de 50 °C debido a que mostró los mejores resultados en los parámetros estudiados (*a_w* y humedad de equilibrio) con menor gasto energético.

Palabras clave: Humedad de equilibrio, curvas de secado, secador de bandejas.

SUMMARY

The purpose of this work was to find a mathematical model that would allow to determine the drying conditions of Cimarron coriander (*Eryngium foetidum*) at different temperatures. In a dryer of perforated trays, in the laboratory, the drying tests were carried out at temperatures of 40, 50 and 60 ° C, with a constant air velocity of 7 m / s. For the analysis of drying curves, two models were used: Lineal and Fornell. The fresh moisture of the Cimarron coriander was 84.70% ± 0.92 and the equilibrium moisture found was 0.05 (g of water / g ss) corresponding to the temperature of 50 ° C, equivalent to a reduction of humidity of 79.4% of its initial content. In this vegetable a decreasing period was observed in most of the drying process for the three treatments. The prediction of the Fornell model presented better adjustments (R2 values higher than 0.99) in the drying curves of the cimarron coriander. The optimal drying temperature was 50 ° C because it showed the best results in the parameters studied (aw and equilibrium humidity), with lower energy expenditure.

Keywords: Equilibrium moisture, curves drying, dryer trays.

INTRODUCCIÓN

El secado es una operación unitaria empleada para la conservación de alimentos. Esta técnica consiste en la eliminación de la totalidad del agua libre de un sólido, lo que permite que se reduzcan las reacciones bioquímicas e inhiban el crecimiento microbiano, por consiguiente, se prolonga la vida útil de los alimentos (Brennan *et al.*, 1998; Casp y Abril, 1999; McCabe *et al.*, 1991; Ratti, 2001). Las ventajas operativas de los productos deshidratados es que disminuye considerablemente el peso de los mismos (son más ligeros), ocupan menor volumen, lo cual consigue ahorros importantes en el almacenamiento y transporte, además su vida útil es mayor, relativamente barato y fácil de implementar (Casp y Abril, 1999). Esta operación unitaria permite estudiar la extracción del agua contenida en los alimentos tipo hierbas por medios físicos hasta que el nivel del agua es adecuado para su conservación por largos periodos (Knoule, 1968). Generalmente, el secado más eficiente y recomendado es el que se realiza por aire caliente y se lleva a cabo en túneles o cabinas donde se coloca el producto, ya que los equipos permiten controlar el proceso de deshidratación: temperatura y velocidad del aire, y la disponibilidad del alimento a secar (Treybal, 1965).

En Venezuela el consumo de cilantro cimarrón principalmente es en hojas frescas, específicamente en alimentos como sopas o caldos, mientras que el consumo en su forma deshidratada es prácticamente nulo, desaprovechando de esta manera una importante oportunidad de esta hierba nacional. La producción de este rubro se obtiene a escala doméstica, cultivadas en patios y jardines de la mayoría de los hogares venezolanos. Es un rubro resistente al clima tropical, lo que lo hace una hierba potencial para la producción intensiva, sin embargo, es estacional, lo que genera que la oferta supere la demanda en consumo fresco, en épocas específicas, generando significativamente pérdidas postcosechas del rubro.

En función de las características particulares del cilantro cimarrón (*Eryngium foetidum*), y considerando además, que no existen precedentes en el estudio de la operación de secado en esta hierba, se plantea como objetivo de la investigación estudiar las condiciones de secado del cilantro cimarrón (*Eryngium foetidum*) aplicando modelos matemáticos, y basando el estudio en la determinación de parámetros como; humedad en base seca, humedad en base húmeda, velocidad de secado, temperatura de secado óptima, así como la humedad crítica y humedad de equilibrio del rubro, para predecir las mejores condiciones para la deshidratación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El tipo de investigación es exploratoria y experimental, desarrollada en el Laboratorio de Ingeniería y Tecnología de Alimentos de la UNELLEZ San Carlos. La población de la investigación consistió en plantas enteras de cilantro cimarrón del estado Cojedes, de los cuales se tomó como subconjunto o muestra la producción de cilantro cimarrón del caserío tierra caliente municipio Ezequiel Zamora, estado Cojedes. Las muestras fueron las hojas y los tallos sin raíz del mencionado rubro, donde la unidad experimental fue representada en cantidades de 200 g. aproximadamente para cada tratamiento térmico. Las muestras frescas (Figura 2) fueron trasladadas hasta el laboratorio de fisiotecnología postcosecha de frutas y hortalizas de la UNELLEZ para su selección (tamaño homogéneo), cortado de raíces,

lavado y escurrido, verificando un acondicionamiento adecuado, y procediendo a la obtención de la harina de cilantro cimarrón de acuerdo al esquema tecnológico presentado en la Figura 1.



Figura 1. Esquema tecnológico para la obtención de harina de cilantro cimarrón.



Figura 2. Cilantro cimarrón seleccionado y lavado

Secado: el cilantro cimarrón acondicionado, se deshidrató en un secador de bandeja, con diferentes temperaturas del bulbo seco (40, 50 y 60 °C) hasta alcanzar peso constante. La velocidad del aire de secado fue 7 m/s para todos los tratamientos, y la carga de trabajo por tratamiento para el cilantro fue 200 g colocados en una bandeja perforada metálica.

Proceso experimental de secado: Los datos del proceso de secado del cilantro cimarrón (humedad del sólido y tiempo) se obtuvieron pesando periódicamente las muestras, a intervalos de 10 minutos para la primera hora luego a intervalos de 20 minutos. El procedimiento se repite para cada tratamiento, con una balanza digital semianalítica.

Técnicas de recolección de datos.

A la muestra de cilantro fresco se le determinó la humedad inicial y la actividad de agua (a_w) antes de ser sometido a la deshidratación. La humedad se determinó de acuerdo al método establecido por la norma AOAC (2005), en la cual se tomaron de 3 g de muestra y se sometió a secado a $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 h., en una estufa de aire forzado hasta llevar a peso constante. Dicho valor se obtuvo por diferencia de peso; el inicial con respecto al peso final. La actividad de agua es un método directo, donde se introduce la muestra en el equipo Aqualab CX-2 Model series 3TE a 25° y se cuantifica la lectura directamente en el equipo proporcionando el valor de la a_w .

Una vez deshidratada la muestra y obtenidos datos del proceso de secado se procedió a la utilización de algunas ecuaciones matemáticas para determinar valores requeridos para la construcción de las curvas de deshidratación.

Cálculo de Humedad en base seca (Hbs), base húmeda (Hbh) y velocidad de secado (Vs).

La humedad del alimento se expresa en Base seca o en base húmeda, y en este caso se cuantificó después que el cilantro cimarrón fue sometido a deshidratación en un determinado tiempo y se calculó como la cantidad de agua en la unidad del sólido del alimento, expresado(a) por las fórmulas:

$$Hbs \text{ (g agua/g ss)} = (Psh - Pss) / Pss \quad \text{Ecuac. 1}$$

$$Hbh \text{ (g agua/g producto)} = (Psh - Pss) / Psh \quad \text{Ecuac. 2}$$

$$Vs \text{ (g agua/g ss.min)} = (-dHs/dt). \quad \text{Ecuac. 3}$$

Psh: Peso del sólido húmedo (producto), Pss: Peso del sólido seco.

De donde $Pss = ((100 - \%humedad \text{ del alimento fresco}) \times Psh) / 100$

Donde, Psho: Peso del sólido húmedo al inicio del proceso de secado en kg.

Técnicas de análisis de datos.

Para la obtención de las curvas de secado experimentales se llevó un registro de los datos obtenidos de forma experimental en intervalos de periodo constantes con los cuales fue posible calcular la humedad (g. agua/ g. ss.) del producto para cada tiempo, obteniendo las gráficas que relacionan la pérdida de humedad con respecto al tiempo, para verificar la existencia de periodos de velocidad constante o periodos de velocidad decreciente. Las curvas de secado obtenidas se analizaron de acuerdo a su cinética, utilizando la ecuación propuesta por Fornell *et al.*, (1980) y un modelo lineal, para ajustar dichas curvas. Finalmente, se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia de los tratamientos estudiados, así como la comparación entre el modelo normalizado y el modelo lineal. Se utilizó para el ANOVA la prueba t- Student con dos colas a un nivel de confianza del 95%, para obtener los porcentajes de error en los dos modelos aplicados y así determinar si los modelos son iguales, se utilizó el software statgraphics plus versión 5.1.

Modelo Normalizado (curva característica de secado).

La aplicación del modelo matemático propuesto por Fornell *et al* (1980) se llevó a cabo mediante el uso de una hoja de cálculo de Excel a partir de los datos obtenidos de humedad contra tiempo.

$$f(w) = ((\Delta w / \Delta \theta) / (T_{bs} - T_{bh}) \cdot V^{0,5}) \quad \text{Ecuac. 4}$$

Donde:

$\Delta w / \Delta \theta$ = Velocidad de secado en el periodo de velocidad (Kg. agua/Kg. sólido seco/hora).
 T_{bs} = Temperatura de bulbo seco (°C); T_{bh}= Temperatura de bulbo húmedo del aire (°C); V= Velocidad del aire; f(w)= función del contenido de humedad; W= contenido de humedad (kg agua/kg sólido seco)

Modelo Lineal.

Se aplicó un modelo lineal las curvas de velocidad de secado en función de la humedad del tipo:

$$\Delta w / \Delta \theta = aW + b \quad \text{Ecuac. 5}$$

Donde:

a y b: son los valores de la pendiente, determinadas para las predicciones de las curvas de secado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Proceso de secado del Cilantro Cimarrón

En la tabla 1, el proceso de secado del Cilantro Cimarrón refleja diferencias entre los tratamientos en cuanto al tiempo de secado del material biológico a 40°C fue de 180 minutos, mientras que para el tratamiento de 50°C fue de 150 minutos y finalmente a 60°C tardó 120 minutos en lograr su peso constante. Es decir que las diferencias de tiempo entre el T40 con T60 son 60 minutos, aun cuando los porcentajes de humedad de equilibrio de los diferentes tratamientos son cercanos. Estos resultados son muy diferentes a los encontrados por Ortiz (2004), quien determinó que el tiempo de secado del cilantro español a 45°C y velocidad de aire de 5 m/s, fue de 540 min. Claro está que, aunque pertenecen a la misma familia de cilantros el aspecto de sus hojas es diferente. La forma de la hoja de Cilantro Cimarrón permite que la superficie de contacto sea muy alta en el secador de bandejas perforadas, favoreciendo notablemente la pérdida de peso de dicho rubro en corto tiempo. En otro tratamiento de Ortiz (2004) donde sólo modificó la velocidad de aire a 10

m/s, el tiempo se redujo a 390min. Quiere decir que la velocidad de aire tiene un efecto combinado con la temperatura para la remoción de la humedad.

Tabla 1. Proceso de secado del cilantro cimarrón utilizando diferentes temperaturas de bulbo seco velocidad de aire constantes.

TIEMPO DE SECADO(min)	PÉRDIDA DE PESO (g)		
	40 °C	50°C	60°C
0	217	210	205
10	149	129	128
20	122	82	73
30	102	62	55
40	87	51	46
50	72	43	39
60	58	38	37
80	46	35,5	35
100	36	34,5	34,8
120	34	34,5	34,8
150	32,95	34,5	
180	32,9		

Actividad de agua (*aw*) del cilantro cimarrón antes y después de la deshidratación

En la tabla 2, se muestra la actividad de agua del Cilantro Cimarrón fresco, la misma mostró un valor de $0,993\pm 0.002$, valor característico en vegetales frescos, que según Badui (2006), la *aw* es superior a 0,97. Luego de la deshidratación del mismo rubro los valores obtenidos de *aw* fueron diferentes para cada tratamiento obteniéndose valores desde 0,440 hasta 0,490 °C para las tres temperaturas de secado. Estos resultados de *aw* en la harina (Figura 3) de la hierba deshidratada reflejan que es un producto de alta estabilidad (Badui, 2006), que impide el crecimiento microbiológico y por tanto alarga la vida útil del alimento.

Tabla 2. Actividad de agua (*aw*) del cilantro cimarrón antes y después de la deshidratación a diferentes temperaturas

RUBRO	FRESCO	DESHIDRATADO		
	34°C	40°C	50°C	60°C
CILANTRO CIMARRÓN	$0,993\pm 0.002$	$0,440\pm 0.005$	$0,490\pm 0.010$	$0,477\pm 0.008$



Figura 3. Muestra de cilantro cimarrón deshidratadas a 50 °C y molida.

Humedad de equilibrio para el cilantro Cimarrón

La tabla 3, indica que la humedad de equilibrio para el T40 fue de 0,06 (g de agua /g ss), mientras que la Hbh fue de 5,68(%), la velocidad de secado 0,219 (g de agua /g de ss. min) y el tiempo de secado total en 180 min. En cuanto al T50 la humedad de equilibrio se alcanzó en 0,05 (g de agua /g ss), la velocidad de secado fue de 0,249 (g de agua /g de ss. Min) y su Hbh final fue de 5,1(%), mientras que el tiempo requerido para alcanzar la humedad de equilibrio fue de 150 min.

Tabla 3. Humedad en base seca, en base húmeda y velocidad de secado del Cilantro Cimarrón a 40°C, 50 °C y 60 °C.

TIEMPO DE SECADO (min)	HUMEDAD BASE SECA (g de agua /g ss)			VELOCIDAD DE SECADO (g de agua /g de ss. Min)			HUMEDAD BASE HÚMEDA (%)		
	T 40°C	T 50°C	T 60°C	T 40°C	T 50°C	T 60°C	T 40°C	T 50°C	T 60°C
0	5,99	5,45	5,211				85,7	84,5	83,9
10	3,8	2,96	2,878	0,219	0,237	0,276	79,17	75,77	71,05
20	2,93	1,52	1,212	0,087	0,157	0,124	74,56	60,3	54,788
30	2,29	0,9	0,666	0,064	0,061	0,055	69,58	47,5	39,991
40	1,8	0,57	0,394	0,048	0,034	0,027	64,33	36,18	28,25
50	1,32	0,32	0,182	0,048	0,025	0,021	56,9	24,3	15,372
60	0,87	0,17	0,121	0,045	0,015	0,006	46,5	14,34	10,797
80	0,48	0,09	0,06	0,019	0,004	0,002	32,54	8,31	5,7
100	0,16	0,06	0,054	0,016	0,002	0	13,8	5,65	5,158
120	0,1	0,05	0,054	0,003	0,000	0	8,73	5,1	5,158
150	0,06	0,05		0,001	0,000		5,825	5,1	
180	0,06			0,000			5,68		

Por último y no menos importante, la misma tabla indica que la humedad de equilibrio para el T60 fue 0,054 (g de agua /g ss), Hbh de 5,16 % a una velocidad de secado de 0,233 (g de agua /g de ss. Min), alcanzando un tiempo de secado total de 120 min. Los tres tratamientos obtuvieron humedades de equilibrio con valores aproximados tanto en Hbs como para Hbh. Es importante resaltar la fuerte influencia de la temperatura de bulbo seco en el tiempo de secado para el cilantro. La velocidad de secado para los tres tratamientos se incrementó directamente proporcional al aumento de temperatura, es decir la Vs en T40 es inferior a la de T50 y ésta menor a T60

Curvas de velocidad de secado para el Cilantro Cimarrón.

En la Figura 4, el tiempo de secado para el cilantro cimarrón es relativamente corto en comparación con otros vegetales, tardando como máximo 180 minutos en la temperatura más baja de deshidratación (T40). En la misma figura se puede visualizar que los Tratamientos T50 y T60 tienen comportamientos similares, mostrando claramente que la humedad en base seca descende rápidamente, al punto que a los 50 minutos se ha retirado, en ambos tratamientos, la mayor cantidad de agua, es decir valores muy cercanos a la humedad de equilibrio del cilantro cimarrón. Mientras que para el T40 se visualiza que retira la mayor cantidad de agua en los primeros 100 minutos de secado. Se evidencia que la temperatura tiene un efecto significativo en el retiro de agua del material biológico.

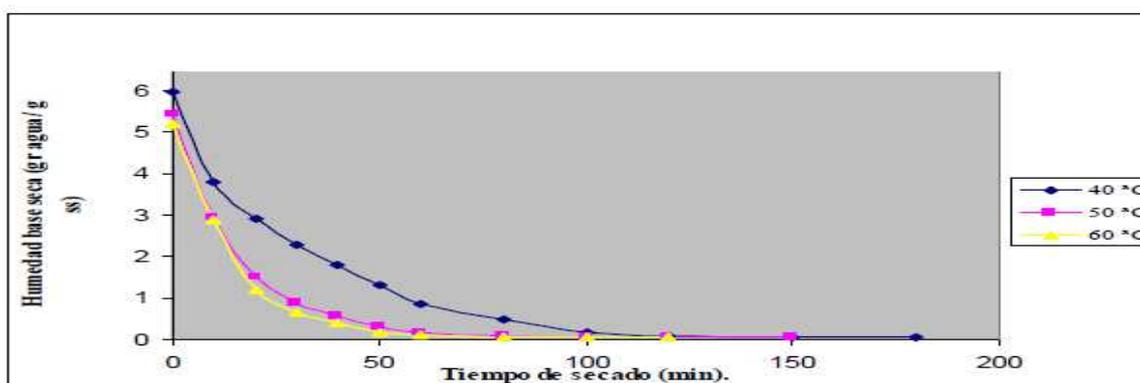


Figura 4. Curva de rapidez de secado del cilantro cimarrón a diferentes temperaturas.

Cinética por el Modelo Lineal.

En la Figura 5, el periodo decreciente de la velocidad de secado para las tres temperaturas es muy similar, es decir, decrecen aceleradamente al inicio del tratamiento y al final se hacen constante al alcanzar la humedad de equilibrio (gr agua/ gr ss). No obstante, la misma figura muestra que la línea de tendencia para la curva de 40°C se aleja significativamente de los datos obtenidos en el proceso de deshidratación para el cilantro cimarrón, a diferencia de las curvas de los demás tratamientos. El ajuste con el modelo lineal para T60 alcanzó un R^2 igual a 0,9941, y para T50 un valor de R^2 0,9750, mientras que para T40 el R^2 sólo alcanzó un 0,8312. Demostrando que a medida que disminuye la temperatura de secado del cilantro cimarrón se dificulta modelar la curva característica de secado con el modelo lineal.

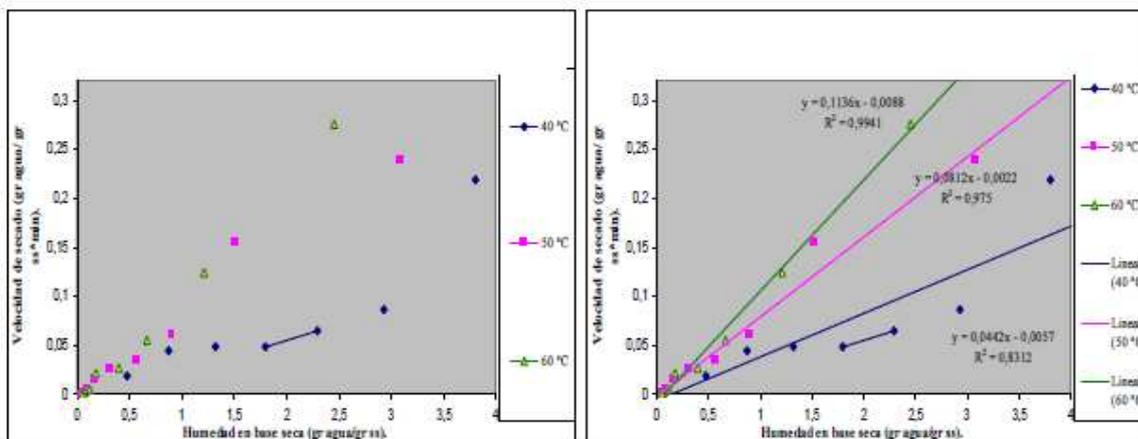


Figura 5. Curvas de velocidad de secado construidas por el modelo lineal para las diferentes temperaturas.

Cinética por el Modelo matemático de Fornell.

La Figura 6, muestra que las líneas de tendencia polinómicas de 3er orden del modelo de Fornell se ajustan mejor a los resultados obtenidos en los tres tratamientos, ya que arrojan el mayor porcentaje de ajuste. Dichos ajustes satisfactorios alcanzaron para T60 un R^2 igual 0,9983, mientras que para T50 el R^2 obtenido alcanzó 0,9982, y por último el T40

arrojó un R^2 igual a 0,9950. Esta comparación de ajustes de modelos se visualiza mejor en la tabla 04. La misma indica que el modelo que predice y construye mejor la cinética de secado del cilantro cimarrón es el de Fornell.

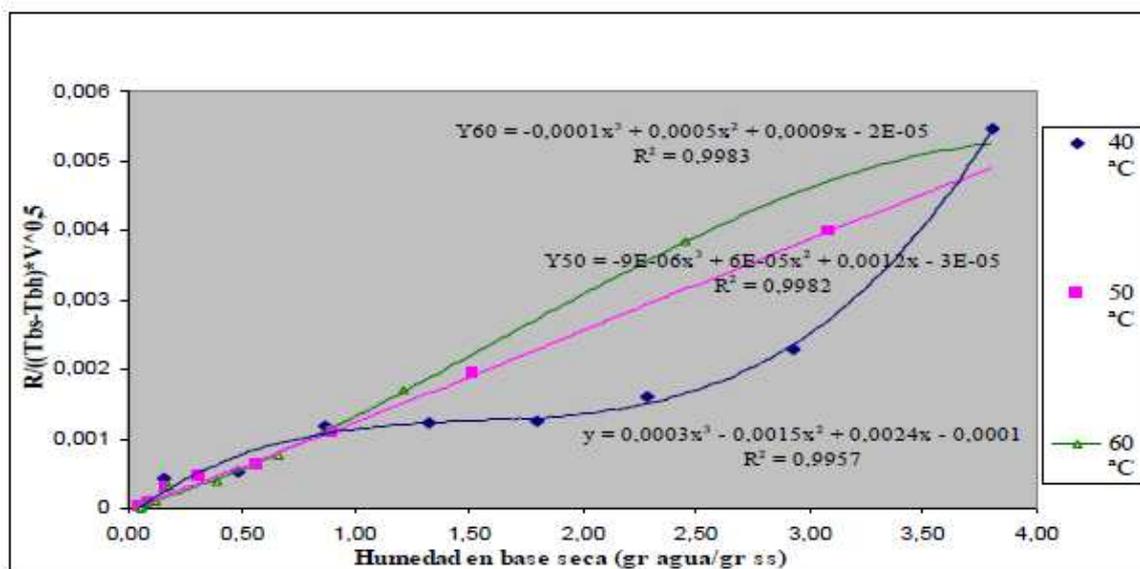


Figura 6. Curvas de velocidad de secado construidas por el modelo de Fornell para las diferentes temperaturas.

Tabla 4. Comparación de los coeficientes de correlación (R^2) del Cilantro Cimarrón determinados por los modelos cinéticos en estudio.

Temperatura	Cilantro Cimarrón	
	Modelo Lineal	Modelo de Fornell
	R^2	R^2
40°C	0,8312	0,9957
50°C	0,975	0,9982
60°C	0,9941	0,9983

Análisis de varianza.

Se modelaron las curvas de secado experimentales para el cilantro cimarrón tanto con la utilización del modelo lineal, como con el modelo de Fornell, y se pudo predecir con exactitud el proceso de secado del rubro. Esto permitió calcular los porcentajes de error

para cada proceso, efectuando inmediatamente las pruebas de hipótesis comparando las predicciones realizadas para cada modelo a las diferentes temperaturas. Se demostró con un 95% de probabilidad que no existe suficiente evidencia significativa como para asegurar que el ajuste del modelo propuesto por Fornell es diferente el modelo lineal propuesto, aún cuando el primero presenta R^2 más altos que el segundo. En la tabla 5 se observa que el valor calculado para t cae fuera de la región de rechazo, por tanto se acepta la hipótesis nula que propone que no existe diferencia significativa en el calculo de los datos de humedad mediante el uso de la curva característica de secado propuesto por Fornell y el modelo líneal, para el cilantro cimarrón. De lo anterior se concluye que no hay suficiente evidencia como para asegurar que los datos predichos sean diferentes a los datos experimentales en el rubro evaluado, no obstante por efectos prácticos se sugiera la utilización del modelo de Fornell para la predicción de cinética de secado en hierbas.

Tabla 5. Prueba de hipótesis para varianzas iguales de datos de humedad de cilantro cimarrón a diferentes temperaturas. Prueba t-student.

	Líneal	Fornell
Media	0,01300236	0,04769389
Varianza	0,00048691	0,00567689
n	3	3
Varianza agrupada	0,00308191	
Diferencia Hipotética de medias		0
Grados de libertad		4
t calculada		-0,765348274
T critica: dos colas		2,776

CONCLUSIONES.

El cilantro cimarrón puede deshidratarse en un tempo máximo de 180 minutos y como mínimo 120 minutos a una velocidad de aire de 7 m/s en un rango de temperatura entre 40 y 60 °C. Las curvas de secado presentan una marcada influencia de la temperatura de bulbo seco del aire, y prácticamente se evidencia sólo periodos decrecientes en la velocidad de secado. Por tanto, se dificulta afirmar cuál es el valor real de la humedad crítica. La predicción del modelo de Fornell presenta un mejor ajuste para los valores obtenidos en las

curvas, en todos los tratamientos aplicados al cilantro cimarrón, reportando todos los valores de R^2 superior a 0,99. La temperatura de secado óptima en el cilantro cimarrón es la de 50 °C debido a que mostró los mejores resultados en los parámetros estudiados (a_w y humedad de equilibrio, con menor gasto energético).

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AOAC., 2005, Association of Oficial Analytical Chemist. Oficial methods of análisis., edition 15th. Washington.
- Badui, S. 2006. Química de los Alimentos. Pearson Adisson Wesley. Cuarta edición, Mexico.
- Brennan, J., J. Butters., N. Cowell, y A. Lilley. 1998. Las operaciones de la ingeniería de los alimentos. 3^{ra}. Ed. Editorial Acirbia, S.A. Zaragoza, España. p. 377-389.
- Casp, A. y J. Abril. 1999. Procesos de conservación de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 325-340.
- Fornell A., Bimbenet J., Almin Y. 1980. Experimental study and Modelization for air Drying of vegetable products. Journal of Food Engineering. USA.
- Knoule F. 1968. El Secado. Bilbao. Ediciones Urno. Pág 50-150. New York. EUA.
- McCabe, W., J. Smith y P. Harriott. 1991. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4^{ta} ed. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A. Madrid. p. 830-846.
- Ortiz V. 2004. Análisis y simulación de procesos de secado de cilantro, perejil y epazote bajo condiciones de temperaturas cambiantes. Tesis Doctoral. Universidad de las Ameritas Puebla. 100pp.
- Ratti, C. 2001. Hot air and freeze drying of high-value foods: A review. Journal of Food Engineering 49: 311-319.
- Treybal R.E., 1965, Operaciones de Transferencia de Masa, 2^a Ed., Mc Graw Hill, cap. 12.