

JON ASPURZ TABAR

OBTENCIÓN DE CURVAS DE SECADO DE TOMILLO
(*Thymus vulgaris*).

Trabajo presentado a la Universidad Federal de Viçosa, como parte de las exigencias del Programa de Graduación en Ingeniero Técnico Agrícola, especialidad en Industrias Agrarias y Alimentarias, para la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

OBTENCIÓN DE CURVAS DE SECADO DE TOMILLO
(Thymus vulgaris).

Trabajo presentado a la Universidad Federal de Viçosa, como parte de las exigencias del Programa de Graduación en Ingeniero Técnico Agrícola, especialidad en Industrias Agrarias y Alimentarias, para la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

Prof. Evandro de Castro Melo
(Orientador)

OBTENCIÓN DE CURVAS DE SECADO DEL TOMILLO (*Thymus vulgaris*)

Resumen: El tomillo (*Thymus vulgaris* L.) es una planta de la familia Lamiaceae con un total de 150 géneros, y con cerca de 2.800 especies distribuidas en todo el mundo. Muchas de las especies introducidas en Brasil son utilizadas como plantas medicinales, y se utilizan también como condimento o como flores ornamentales. El tomillo es una planta originaria del Mediterráneo (España, Italia, Francia, Grecia). El aceite esencial del tomillo tiene actividad antimicrobiana, actividad carminativa y expectorante, que se atribuyen a los compuestos timol y carvacrol que son compuestos fenólicos del aceite. El objetivo de este trabajo será evaluar 5 modelos matemáticos diferentes (Henderson y Pabis, Henderson y Pabis modificado, aproximación de la difusión, Thompson, y Wang & Sing) para determinar la curva de secado del tomillo. Para el experimento se utilizará un secador de aire con un ventilador que sopla el aire de secado con flujo de aire hacia arriba y cinco bandejas de dimensiones de 0,25 x0, 25x0, 15 m, y la malla de fondo, en posición horizontal. El calentamiento del aire se realiza mediante resistencias eléctricas. Se utilizarán plantas de tomillo, obtenidas de un vivero ubicado en la Universidad Federal de Viçosa, Brasil. Antes del secado, las ramas de plantas de tomillo se cortan y se retiran manualmente y se almacenan en bolsas de polietileno (40 μm). El secado del tomillo se realizará con aire caliente a diferentes temperaturas (30, 40, 50, 60 y 70°C), con tres repeticiones. Para todos los tratamientos, la velocidad de secado de aire a través de la masa de las plantas se mantendrá en aproximadamente 1 m s^{-1} . La velocidad de secado se determinará mediante la reducción de la masa de las plantas durante el proceso de secado. Para obtener los datos de la temperatura del aire ambiente, del aire de secado, del aire en la masa del producto y de la humedad relativa del aire ambiente y del aire de secado, se utilizará un sistema de adquisición de datos automática, conectado a un ordenador, y mediante el uso de termopares (sensores de temperatura) tipo T. Para ajustar los modelos matemáticos a los datos experimentales utilizaremos análisis de regresión no lineal, con el método Simplex y cuasi-Newton, utilizando el software STATISTICA ® 8.0, siendo los valores de los parámetros de los modelos, estimados en función de la temperatura del aire de secado. Esperamos obtener un modelo matemático para proporcionar una solución satisfactoria para describir el proceso de secado del tomillo, independientemente de la temperatura del aire de secado.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	05
ÍNDICE DE TABLAS.....	05
INTRODUCCIÓN.....	06
REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
Las plantas medicinales.....	10
Tomillo (<i>Thimus vulgaris</i>).....	10
Secado	12
Contenido de agua de equilibrio.....	13
Modelos matemáticos para las curvas de secado.....	14
MATERIAL Y MÉTODO.....	17
Material vegetal.....	17
Determinación de la cantidad inicial de agua.....	18
Secado.....	18
Modelos matemáticos para las curvas de secado.....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
Difusividad efectiva, energía de activación y curvas de secado.....	24

CONCLUSIONES.....	31
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	32
ANEXO.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Fórmula estructural de los principales componentes presentes en el aceite esencial del tomillo (<i>Thymus vulgaris</i> L.).....	11
Figura 02. Procedimiento de la planta del tomillo antes de iniciar los ensayos de secado.....	17
Figura 03. Esquema del secador.....	19
Figura 04. Relación de tipo Arrhenius entre el coeficiente de la difusividad efectiva y la temperatura absoluta del aire de secado de las hojas de tomillo.....	25
Figura 05. Curvas de secado de tomillo a 30°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70°C ajustadas por el modelo de Page.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Modelos matemáticos que fueron desarrollados para describir el proceso de secado de las hojas de <i>Thymus vulgaris</i>	21
Tabla 02. Valores de la difusividad efectiva (Def) obtenidos para las hojas de tomillo en diferentes temperaturas de secado.....	24
Tabla 03. Valores estimados de los parámetros para el modelo de Page para el secado de las hojas de tomillo a diferentes temperaturas de aire.....	26
Tabla 04. Valores de los coeficientes de determinación (R^2), errores medios relativos (EMR) y de los errores medios estimados (EME), obtenidos para los modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de secado de las hojas de tomillo...	41

INTRODUCCIÓN

Desde los principios de la humanidad la utilización de las plantas medicinales han sido utilizadas para el tratamiento de las dolencias (MARTINS et al., 1994).

En la actualidad se está dando una expansión muy grande de las plantas medicinales por diferentes razones o factores, como el alto coste de los medicamentos sintéticos o la falta de acceso a los agentes quimioterapéuticos para una gran parte de la población. Es por ello que los consumidores prefieren consumir cada vez más productos de origen natural, principalmente por la falta de indicaciones de los efectos colaterales que pueden producir los medicamentos sintéticos (LORENZI & MATOS, 2002).

Brasil es el país con mayor número de especies animales y vegetales del mundo, contando con un número estimado de 10% y 20% del total. La mayoría de las plantas existentes son encontradas en países tropicales y se estima que cerca del 25% se encuentran originalmente en Brasil. Cerca de 25 mil especies de plantas medicinales son utilizadas en todo el mundo para la obtención de medicamentos, incluyendo no solamente aquellos obtenidos por síntesis a partir de productos naturales, sino que también los medicamentos comercializados como productos fitoterápicos (BRAGA, 2002).

Se estima en unos 300 billones de dólares los obtenidos en el mercado mundial de medicamentos, aproximadamente el 40% de los medicamentos derivan directa o indirectamente de fuentes naturales (siendo el 75% de origen vegetal y el 25% de origen animal y de microorganismos). La comercialización de medicamentos fitoterápicos viene creciendo en una tasa anual media del 15%, siendo más evidente en los países europeos como Alemania, Francia, Italia, Inglaterra, además de naturalmente de los países asiáticos, donde las plantas medicinales constituyen una gran parte las terapias disponibles.

Brasil tiene una gran perspectiva de crecimiento en el segmento de fiterápicos ya que en el año 2000 obtuvo 550 US\$ mientras que en al año 2010 obtuvo 1,1 US\$ (MENDONÇA, 2003). Además de eso, el país ocupa un importante lugar en la

producción de óleos esenciales debido a la producción de óleos cítricos, que son subproductos de la industria de sucos. En el año 2008 Brasil exportó un 5% del total de óleos importados por la Unión Europea y se encuentra entre los grandes exportadores internacionales (BIZZO et al., 2009).

Este crecimiento requiere esfuerzos por parte de los investigadores para poder proporcionar información sobre la producción, cosecha y las prácticas de post-cosecha con el fin de obtener el mayor rendimiento posible.

En la etapa de post-cosecha merecen especial atención las etapas de secado y almacenamiento, ya que el manejo adecuado de estas puede evitar pérdidas y contribuir en la conservación del producto.

Un secado inadecuado afecta al contenido y composición de los principios activos y el almacenamiento inadecuado conduce a la pérdida de los componentes químicos de los aceites esenciales, ya sea por razones de salud física o biológica. Podemos decir que los estudios sobre los procesos de post-cosecha de las plantas medicinales, hierbas y especias son todavía insuficientes (Segundo Fennell et al., 2004). Los cambios químicos son los más importantes en la post-recolección de plantas medicinales.

El objetivo del secado es el de reducir el contenido de agua, haciendo que la actividad de agua en los productos “in natura” disminuya significativamente. De esta manera se aumenta el tiempo de conservación y la vida útil del producto facilitando su transporte, manejo y almacenamiento. A parte de esto proporciona una estabilidad de los componentes químicos a temperatura ambiente durante largos periodos de tiempo y ofrece protección contra la degradación enzimática y oxidativa (PARK et al., 2001).

Un inadecuado secado puede reducir la calidad comercial del producto antes del almacenamiento mismo o acelerar el proceso de deterioro del producto.

Entre los principales parámetros que deben de observarse en el secado son la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire de secado. Sin embargo, se deben considerar otros parámetros como la temperatura del producto durante el proceso.

Los límites de temperatura en el secado para las diferentes plantas medicinales son diferentes para cada planta según la sensibilidad de los compuestos químicos que tenga y de las estructuras almacenadoras que tenga cada planta. Las altas temperaturas pueden llevar a la pérdida de los compuestos químicos de los aceites esenciales por volatilización o degradación (VENSKUTONIS, 1997; LEWINSOHN et al., 1998).

Diversas son las plantas medicinales, aromáticas y condimentales utilizadas y comercializadas en Brasil y en el mundo. Entre todas ellas una muy importante es el tomillo (*Thymus vulgaris*).

El tema de las plantas medicinales es un tema multidisciplinar, siendo necesaria la actuación conjunta de químicos, médicos, farmacéuticos, biólogos, ingenieros agrónomos y agrícolas, botánicos y agricultores, los cuales son los profesionales responsables de la seguridad, desde la producción de la materia prima hasta su consumo final para que los principios activos, producidos a partir de estas plantas puedan ser usados con eficacia y sin riesgos de los consumidores (SILVA & CASALI, 2000).

Por lo tanto en los procesos de post-cosecha de plantas medicinales, aromáticas y condimentales, principalmente el secado y almacenamiento, asumen un papel de extrema importancia en la cadena de producción, porque repercuten directamente en la calidad y cantidad de los principios activos que serán comercializados. Hasta hoy en día los trabajos de secado de plantas medicinales, específicamente, que estudiaban la influencia del proceso de secado en la calidad y cantidad de los principios activos fueron realizados manteniendo constante la temperatura de secado durante los ensayos. Es decir, en estos trabajos se estudiaba como influenciaba en el principio activo el secado realizado a temperatura constante durante todo el ensayo.

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Obtener una nueva metodología de secado para las hojas de tomillo, para maximizar la calidad y cantidad de los componentes químicos de los aceites esenciales del producto final.
- Obtener las curvas de secado en función de la temperatura del aire de secado y posterior ajuste de los datos experimentales a los diferentes modelos matemáticos

- Determinar los valores del coeficiente de difusión y la energía de activación

REVISIÓN DE LITERATURA

Plantas medicinales:

La utilización de plantas medicinales, o también denominadas plantas médicas, se ha producido en todas las culturas desde tiempos remotos. El gran interés suscitado en la actualidad en torno a la fitoterapia (uso medicinal de las plantas), no obedece a un hecho puntual o a una moda. Nuestra época está marcada por la búsqueda de una vida más sana y una mejora de la calidad de vida, para conseguirlo el hombre se ha dado cuenta de la necesidad de volver los ojos a los valores esenciales que siguen estando básicamente en la naturaleza, como en el caso de las plantas medicinales.

Tomillo (*Thymus vulgaris*):

Como comentaba antes, el tomillo (*Thymus vulgaris* L.) es una planta medicinal y aromática, perteneciente a la familia Lamiaceae, originaria de Europa y cultivada en el sur y sureste de Brasil. La familia Lamiaceae comprende 150 géneros, con cerca de 2800 especies distribuidas por todo el mundo, siendo el mayor centro de dispersión la región mediterránea. Dentro de estos géneros cultivados se podrían destacar: salvia (*Salvia officinalis*), albahaca (*Ocimum basilicum*), orégano (*Origanum vulgare* L.), manjerona (*Origanum majorana* L.) entre otras (PORTE & GODOY, 2001; MEWES et al., 2008).

El cultivo de tomillo no demanda muchas exigencias, prefiriendo regiones secas, áridas, expuestas al sol y en suelos arenosos y calcáricos. Es una planta de suelos pobres, rústica, evitando humedades y tierras compactadas (CASTRO & CHEMALE, 1995).

Las hojas de tomillo son ampliamente utilizadas en la cocina como condimento. Esta planta también es utilizada en la industria de perfumes como aromatizante natural de licores. El timol, componente de su aceite esencial, es un ingrediente importante en las pastas de dientes. Sin embargo, es tradicionalmente utilizado en la medicina popular como astringente, expectorante, digestivo, antiespasmódico, antitusígeno, antiséptico y antifúngico. Propiedades farmacológicas de los diferentes extractos y aceites esenciales

de tomillo fueron estudiados en detalle y trajo importantes contribuciones a la industria (principalmente como aditivo para los alimentos) y los usos medicinales de la planta. Además de todos estos usos tradicionales numerosos, la planta y su aceite esencial tienen diversas aplicaciones en la industria (LORENZI & MATOS, 2002).

La actividad biológica del aceite esencial del tomillo está relacionada con sus principales componentes, denominados timol y carvacrol. El timol tiene efectos antibacterianos, antifúngicos y antihelmínticos. En cuanto al carvacrol ha sido estudiado por sus efectos bactericidas. Todos estos efectos del aceite esencial del tomillo fueron demostradas por diversos estudios como Higes e Llorente (1996), Daferera et al. (2000), Bagamboula et al. (2004), Novacosk e Torres (2006), Soković et al. (2009) y Centeno et al. (2010).

Estudios fotoquímicos investigaron la composición del aceite esencial del tomillo (Figura 01) (ECHEVERRIGARAY et al., 2001; HUDAIB et al., 2002). El timol es el compuesto mayoritario en la composición química del aceite esencial del tomillo, seguido por el carvacrol, según lo descrito por varios autores (OZCAN & CHALCHAT, 2004; PORTE & GODOY, 2008; HAJIMEHDIPOOR et al., 2010; LISI et al., 2011).



Figura 01. Fórmula estructural de los principales componentes presentes en el aceite esencial del tomillo (*Thymus vulgaris* L.).

Otra actividad benéfica observada en el aceite esencial del tomillo, es su propiedad antioxidante. Los componentes químicos con capacidad antioxidante (que tienen la capacidad de desactivar los radicales libres) que se encuentran en altas concentraciones en las plantas de tomillo, determinan un papel importante en la prevención de muchas enfermedades crónicas degenerativas como el cáncer o el Alzheimer (HU & WILLETR, 2002). El extracto de tomillo mostró ser eficiente en la

inhibición de las fases del proceso de peroxidación neutralizando radicales libres, bloqueando la peroxidación catalizada por el hierro e interrumpiendo las reacciones en cadena (DORMAN et al., 2003, 2004; SHAN et al., 2005).

Secado:

Importancia del secado de plantas medicinales:

Una de las primeras operaciones posteriores a la cosecha, destinadas a mantener la calidad de los productos agrícolas es el proceso del secado. El secado consiste en la eliminación parcial del agua libre contenida en estos productos hasta que llegan a un contenido de agua que permite el almacenamiento por mucho tiempo, sin que ocurra el deterioro de estos productos. Cuando el secado se realiza de forma incorrecta, podría reducir la calidad del producto antes de su almacenamiento o acelerar el proceso de deterioro.

Después de la cosecha, se inicia un proceso de degradación en las plantas, debido al aumento de la actividad enzimática, que a su vez conduce a la degradación de los principios activos presentes en las mismas. Para minimizar estos efectos, las plantas medicinales deben secarse. La conservación de la calidad de los productos por el secado se basa en que tanto las enzimas como los microorganismos necesitan agua para realizar sus actividades. Con la reducción de la cantidad de agua disponible, hasta niveles seguros para almacenamiento se reducirá la actividad de agua y la velocidad de las reacciones químicas en el producto, así como el desarrollo de microorganismos. El alto contenido en agua en las células y tejidos de las plantas, en torno al 60% - 80%, hacen que el secado tenga una importancia fundamental para evitar la fermentación o degradación de los principios activos. (CHRISTENSEN & KAUFMANN, 1974; REIS et al., 2003).

El secado de debe llevarse a cabo hasta que el producto llegue a tener un contenido de agua en torno al 8%-12% b.u, según la especie y la parte de la planta que estemos secando. Para esos niveles de contenido de agua la mayoría de las especies pueden ser almacenada por largos periodos sin que se deteriore o se desarrollen microorganismos (FARIAS, 2003). El proceso de secado no debe ser muy rápido ni

muy lento, ya que cuando el proceso es rápido ocurren volatilizaciones de los compuestos químicos presentes o su degradación. Si el proceso fuera lento, puede propiciar al apareamiento de microorganismos, por eso es que durante el secado es muy importante saber la velocidad con la que el agua es retirada de la planta medicinal (SILVA & CASALI, 2000).

El tiempo de secado depende del flujo del aire de la temperatura y de la humedad relativa de aire. Cuanto mayor es la temperatura y mayor flujo de aire, más rápido es el secado (BROOKER et al., 1992). La temperatura de secado es determinada por la sensibilidad de los principios activos de la planta, por lo tanto, para cada especie, tiene una temperatura ideal de secado. Por todo esto algunos investigadores estudian el efecto del secado sobre la calidad y cantidad de aceite esencial extraído en determinadas plantas.

Los principales objetivos y ventajas de realizar el secado son la facilidad de conservación del producto hasta la estabilidad de los componentes aromáticos a temperatura ambiente durante un largo tiempo. También tiene como objetivo la protección contra la degradación oxidativa y enzimática, reducir el peso y tamaño, no tener que refrigerarlo durante el transporte y almacenamiento y la disponibilidad del producto durante todas las épocas del año (DOYMAZ, 2004a).

Contenido de agua de equilibrio

Como todo material higroscópico, las plantas medicinales tienen la propiedad de ceder o absorber agua del ambiente, tendiendo, constantemente, a mantener una relación de equilibrio entre su contenido de agua y el ambiente. Si un material higroscópico es mantenido en contacto con el aire en condiciones constantes de temperatura y humedad relativa hasta que la condición de equilibrio sea alcanzada y su contenido en agua también tendrá un valor prácticamente constante, el conocido como contenido en agua de equilibrio. (SOKHANSANJ & YANG, 1996)

El valor de contenido en agua de equilibrio para diversos materiales depende de la manera como la condición de equilibrio es obtenida. Un determinado valor es obtenido cuando el producto húmedo pierde humedad por desorción durante el secado.

Por otro lado, se obtiene un valor diferente cuando el producto relativamente seco gana humedad por adsorción en un ambiente con humedad relativa elevada. De esta forma, para un mismo valor de humedad relativa y temperatura, pueden haber dos valores distintos de contenido de agua de equilibrio (BERBERT et al., 2000).

Muchos autores estudian el comportamiento higroscópico de varios productos agrícolas utilizando diferentes métodos para expresar la cantidad de agua de equilibrio higroscópico en función de la temperatura y la humedad relativa del aire, lo que son conocidos como isothermas de porción. Para el establecimiento de isothermas que representen esa relación de equilibrio son utilizados modelos matemáticos empíricos, una vez que ningún modelo teórico desarrollado ha sido capaz de estimar con exactitud la cantidad de agua de equilibrio higroscópico para un amplio rango de temperatura y humedad relativa del aire.

Modelos matemáticos para las curvas de secado

Los modelos matemáticos son herramientas utilizadas para estimar el tiempo necesario para reducir la humedad de agua del producto en diferentes condiciones de secado mejorando la eficiencia del proceso (ANDRADE et al., 2003). El ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos es indispensable que se haga para todas las plantas medicinales y aromáticas para obtener el modelo más adecuado para cada especie.

La utilización de modelos matemáticos para predecir el fenómeno de secado en diversos productos, incluido en las plantas medicinales, han sido objeto de diversos estudios (PARK et al., 1996; SIMAL, et al., 2000; PARK et al., 2001; AZZOUZ et al., 2002; BABALIS & BELESSIOTIS, 2004; DOYMAZ, 2005, 2006, 2009 e 2010; RADÜNZ et al. 2011).

Se pueden utilizar modelos teóricos, empíricos y semiempíricos. Los modelos teóricos llevan en consideración solo la resistencia interna, la transferencia de calor y agua entre el producto y el aire caliente (difusividad efectiva) y los empíricos y semiempíricos presentan una relación directa entre la humedad del producto y el tiempo de secado. Los modelos empíricos derivan una relación directa entre el contenido medio

de agua y el tiempo oda secado. A pesar de que no dan una visión clara y precisa de los procesos que ocurren durante el secado, estos pueden describir la curva de secado para las condiciones en las que fue realizado el estudio (Panchariya et al., 2002).

Entre los modelos semiteóricos tenemos los modelos de Page, Page modificado, Henderson & Pabis, Logarítmico, Aproximación a la difusión, Dos termos y Exponencial de dos termos, que se utilizan para la cinética del secado de productos agrícolas (CORRÊA et al., 2007; DOYMAZ, 2007a; MOHAPATRA e RAO, 2005; LAHSASNI et al., 2004; MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002; OZDEMIR e DEVRES, 1999).

Los modelos empíricos no forman una perspectiva de los importantes procesos que suceden durante el secado, aunque en algunos casos pueden describir las curvas de secado para determinadas condiciones experimentales (KEEY, 1972). Entre estos modelos, el que más ha sido utilizado en estudios de cinética de secado de productos agrícolas es el modelo propuesto por THOMPSON et al. (1968).

En este trabajo realizado con el tomillo se han propuesto 12 métodos diferentes de predecir el comportamiento del secado y determinar la curva de secado de la hierba:

- 1- Aproximación a la difusión
- 2- Dos termos
- 3- Exponencial de dos termos
- 4- Henderson & Pabis
- 5- Henderson & Pabis modificado
- 6- Lewis
- 7- Logarítmico
- 8- Midilli et al.
- 9- Thompson

10- Page

11- Page modificado

12- Wang e singh

MATERIAL Y MÉTODOS

Material vegetal:

Thymus vulgaris

Las plantas de tomillo utilizadas para el desarrollo de este trabajo provienen de plantaciones localizadas en el área experimental de Riego y Drenaje, que pertenece a la Universidad Federal de Viçosa. Las plantas eran cultivadas individualmente en vasos y, antes de secado, los ramos eran cortados, se retiraban las hojas manualmente y almacenadas en sacos de polietileno (40 μm) a $4 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta el momento del secado (Figura 02).

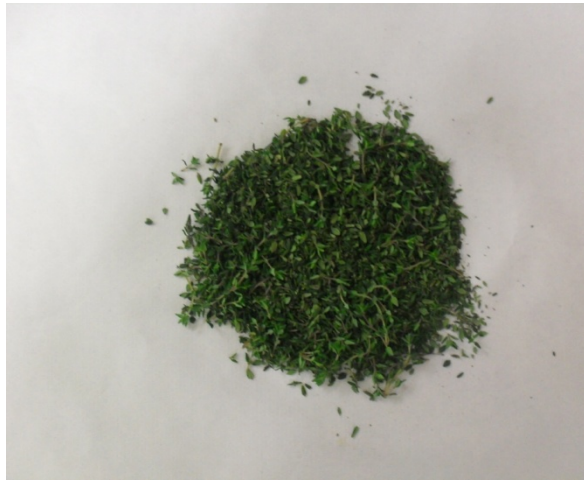
Fueron seleccionadas aleatoriamente 3 muestras todavía frescas para obtener la cantidad de agua inicial y realizar análisis químicos.



Planta entera de tomillo



Ramos con hojas de tomillo



Hojas



Hojas en sacos de plástico

Figura 02. Procedimiento de la planta del tomillo antes de iniciar los ensayos de secado.

Determinación de la cantidad inicial de agua

La cantidad de agua inicial fue determinada de acuerdo a la metodología descrita por la AOAC (1997), utilizándose 5g de muestra, en tres repeticiones en una estufa al vacío y una temperatura de $70 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 24 horas.

Secado

El secado fue realizado en el laboratorio de Pre-procesamiento de Plantas Medicinales, Aromáticas y Condimentales del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa.

Utilizamos un secador de flujo de aire ascendente (Figura 03). El secador disponía de un sistema de pesado automático que se registraba en un microcomputador cada 5 min. Se registraba la masa del producto, la humedad relativa, temperatura del aire en el ambiente y en el secado y la velocidad del aire de secado. La velocidad del aire de secado fue de 1 m s^{-1} para todos los ensayos de secado y el secado se finalizaba cuando el producto llegaba a un contenido de agua de 10% b.u

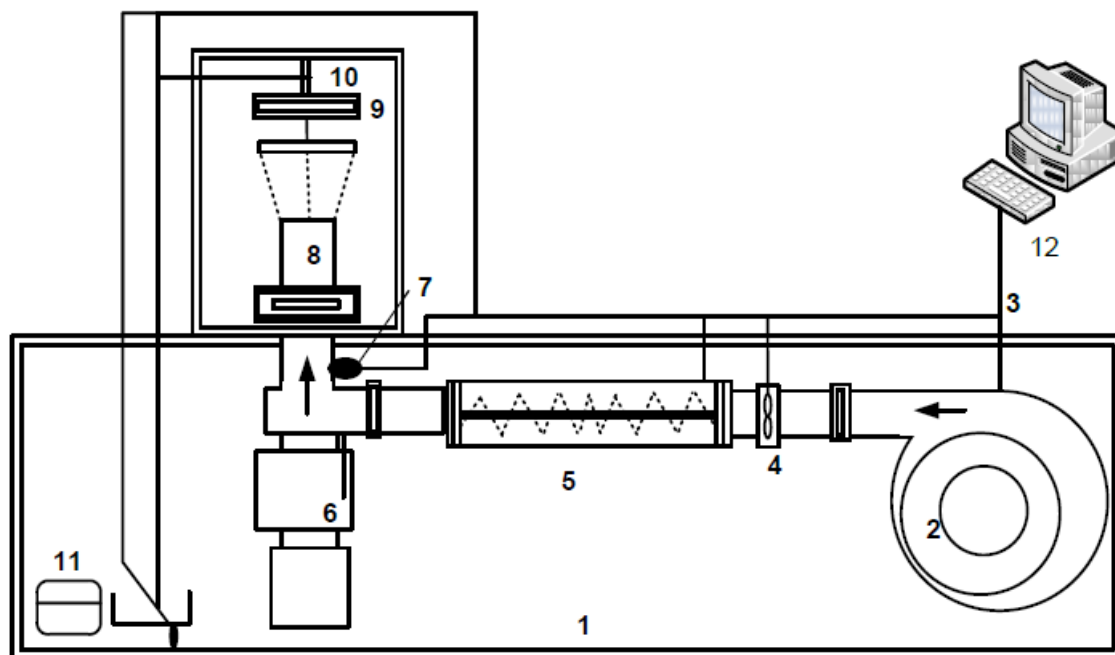


Figura 03. Esquema del secador. 1. Soporte; 2. Ventilador; 3. Control del flujo del aire; 4. Anemómetro; 5. Resistencias eléctricas; 6. Válvula pneumática; 7. Sensor de temperatura; 8. Camara de secado; 9. Balanza; 10. Elevador; 11. Compresor; 12. Computador de adquisición de datos y control.

En ausencia de un método rápido para determinar la cantidad de agua de plantas medicinales, al finalizar el proceso de secado fue calculado matemáticamente, obteniéndose el peso inicial deseado a través de la ecuación que aparece abajo. La cantidad inicial de agua fue, previamente determinada por el método gravimétrico, y finalmente fijada en 10% de humedad.

$$mf = mi \times \left(\frac{100 - X_i}{100 - X_f} \right)$$

Donde:

mf - masa final (g);

mi - masa inicial (g);

X_i - cantidad inicial de agua (% b.s);

X_f - cantidad final de agua (% b.s).

Para la realización de este trabajo se realizaron ensayos a diferentes temperaturas de secado (30, 40, 50, 60, 70°C), y se realizaron 3 repeticiones de cada una de estas temperaturas. Para todas las variables fue aplicado un análisis de regresión para el factor cuantitativo (temperatura). Los modelos matemáticos utilizados fueron elegidos de acuerdo con el fenómeno biológico, coeficiente de determinación la significación de los coeficientes de regresión utilizando el nivel de probabilidad de hasta un 5% y el test de "t". El software estadístico utilizado fue el Sistema de Análisis Estadístico para la Genética y SAEG (versión9.1).

Modelos matemáticos para curvas de secado

La cantidad de agua de equilibrio del tomillo fue determinada por la ecuación de Halsey modificado propuesta por Soysal e Oztekin (2001):

$$X_e = \frac{\ln(UR)}{\exp(a + b \cdot T^d)^{1/c}}$$

Donde:

T - Temperatura de aire (K);

a,b,c,d - constantes que dependen de la naturaleza del producto. Para el tomillo:

$$a = 2,97977; b = - 0,00258; c = 1,44139; d = 1,37743$$

La cantidad de agua (RX), durante las diferentes condiciones del aire de secado, fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e}$$

Donde:

RX - razón de cantidad de agua (adimensional);

Xt - cantidad de agua del producto en el tiempo x (b.s.);

X₀= cantidad de agua inicial del producto (b.s.).

Los valores experimentales de RX, para cada temperatura diferente del aire de secado, fueron ajustados a 12 diferentes modelos matemáticos citados en la literatura conforme en la siguiente tabla. (Tabla 01).

Tabla 01. Modelos matemáticos que fueron desarrollados para describir el proceso de secado de las hojas de *Thymus vulgaris*.

Modelo	Ecuación	Referencia
Aprox. a la difusión	$RX = a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.b.t)$	Sharaf-Elden et al. (1980)
Dos términos	$RX = a.exp(-k_0.t)+b.exp(-k_1.t)$	Henderson (1974)
Exponencial de dos términos	$RX = a.exp(-k.t)+(1-a).exp(-k.a.t)$	Kassem (1998) apud Togrul & Pehlivan (2003)
Henderson & Pabis	$RX = a.exp(-k.t)$	Henderson e Pabis (1961)
Henderson & Pabis Modificada	$RX = a.exp(-k.t)+b.exp(-k_0.t)+c.exp(-k_1.t)$	Karathanos (1999)
Lewis	$RX = exp(-k.t)$	Lewis (1921)
Logarítmico	$RX = a.exp(-k.t)+c$	Akpinar & Bicer (2005)
Midilli et al.	$RX = a.exp(-k.t^n)+b.t$	Midilli et al. 2002
Thompson	$RX = exp(-a-(a^2+4.b.t)^{1/2})/2.b$	Thompson et al. (1968) Page (1949) apud Bruce (1985)
Page	$RX = exp(-k.t^n)$	(1985)
Page modificado	$RX = exp(-k.t)^n$	Overhults et al. (1973)
Wang & Singh	$RX = 1+a.t+b.t^2$	Wang & Singh (1978)

La difusividad efectiva fue calculada por la basada en la ley de Fick, utilizándose ocho variables para la ecuación:

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2}\right]$$

Donde:

L - espesura del producto (m).

La energía de activación, que expresa la dependencia de la difusividad en función de la temperatura, fue calculada por la ecuación de de Arrhenius:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R \cdot T}$$

Donde:

D_{ef} - difusividad efectiva ($m^2 s$);

D_0 - Factor de Arrhenius ($m^2 s$);

E_a - Energía de activación ($J mol^{-1}$);

R - Constante universal de los gases ($8,3143 J. mol^{-1} K^{-1}$);

T - Temperatura (K).

Para el ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales fue realizado el análisis de regresión no lineal, por el método Simplex-Quasi-Newton. Para ello utilizamos el programa STATISTICA 8.0[®]. Los valores de los parámetros de los modelos fueron estimados en función de la temperatura del aire de secado.

La elección del modelo fue realizada en función del coeficiente de determinación ajustado (R^2), del error medio relativo (EMR) y del error medio estimado (EME). El error medio relativo y el error medio estimado para cada modelo, fueron determinados por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$EMR = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y}$$

$$\text{EME} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{\text{GLM}}}$$

Donde:

n - número de observaciones;

Y - valor observado;

Y0 - valor estimado por el modelo; y

GLM - Número de observaciones menos uno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Difusividad efectiva, energía de activación y curvas de secado

Para la determinación de las curvas de secado del tomillo, los valores de cantidad de agua en equilibrio fueron calculadas por medio del modelo de Halsey modificado, obteniéndose los siguientes valores: 8,56; 5,07; 3,08; 2,03; y 1,56% b.u., respectivamente, para el secado con aire a 30, 40, 50, 60, y 70°C.

Los valores calculados de la difusividad efectiva para las hojas de tomillo están representados en la tabla 02. Podemos apreciar en los datos obtenidos que la difusividad efectiva aumenta con el aumento de la temperatura del aire de secado en el rango de temperaturas con las que hemos trabajado (30 a 70°C), evidenciando la reducción de las resistencias internas de difusión de agua con la elevación de la temperatura.

Tabla 02. Valores de la difusividad efectiva (Def) obtenidos para las hojas de tomillo en diferentes temperaturas de secado.

Temperatura (°C)	Difusividad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
30	$3,689 \times 10^{-12}$
40	$7,760 \times 10^{-12}$
50	$2,089 \times 10^{-11}$
60	$5,626 \times 10^{-11}$
70	$1,190 \times 10^{-10}$

Los valores de la difusividad efectiva varían entre $,689 \times 10^{-12}$ e $1,190 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el rango de temperatura estudiada. Doymaz (2010) al estudiar el secado de esa misma especie, en el rango de temperatura de 40 a 60°C y velocidad del aire de 2 m s^{-1} , observó que los valores fueron de de 1.097 a $5.991 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

En la figura 04, están representados los valores de la difusividad efectiva (Def) en función de la temperatura absoluta del aire de secado.

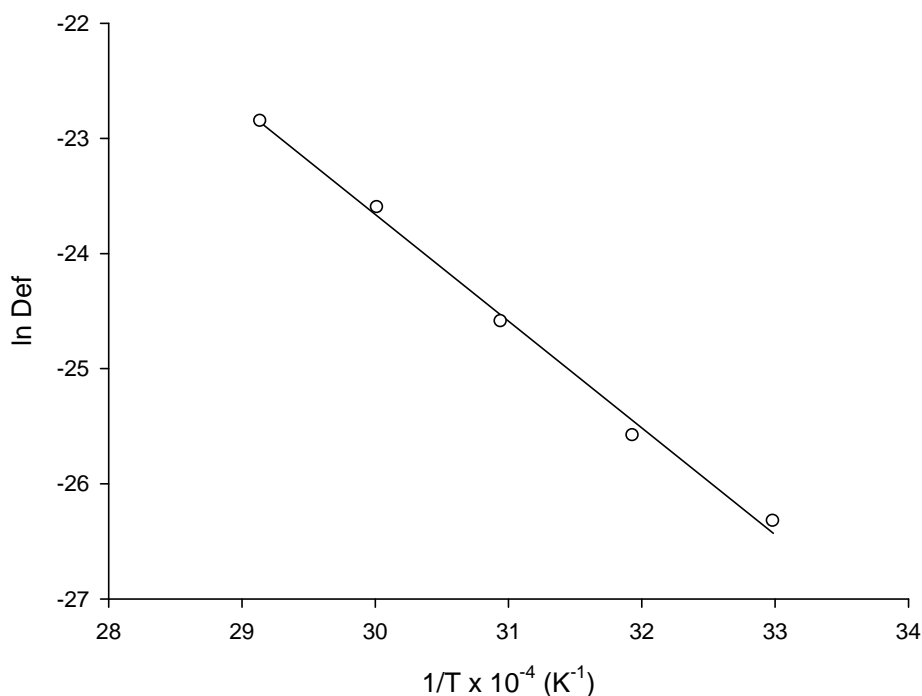


Figura 04. Relación de tipo Arrhenius entre el coeficiente de la difusividad efectiva y la temperatura absoluta del aire de secado de las hojas de tomillo.

La energía de activación para la difusión de agua para las hojas de tomillo en condiciones estudiadas fue de $77,16 \text{ kJ mol}^{-1}$. Este valor es muy próximo al encontrado por Doymaz (2010) al trabajar en el secado de esta misma especie, siendo el valor encontrado de $73,84 \text{ kJ mol}^{-1}$. La energía de activación para el secado de diversos productos viene siendo foco de estudios de varios trabajos, como por ejemplo, Simal et. al. (2000) donde encontró el valor de la energía de activación de $24,40 \text{ kJ mol}^{-1}$ para babosa, $82,93 \text{ kJ mol}^{-1}$ para menta (PARK et al., 2002), $51,26 \text{ kJ mol}^{-1}$ para okra (DOYMAZ, 2005), $34,35 \text{ kJ mol}^{-1}$ para espinaca (DOYMAZ, 2009) e $31,79 \text{ kJ mol}^{-1}$ para básmamo de limón (BARBOSA et al., 2007).

En la tabla 05 del anexo son presentados los valores de los coeficientes de determinación, los errores medios relativos y los errores medios estimados de los modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales del secado de las hojas de tomillo. Los coeficientes de determinación por encima de 98% representan un buen ajuste del modelo matemático para describir el fenómeno de secado (MADAMBÁ et al., 1996). De acuerdo con Aguerre et al. (1989), los resultados de errores medios relativos

inferiores al 10% indican un buen ajuste de los valores observados en relación a los ajustados por el modelo en cuestión. El valor del error medio estimado es inversamente proporcional a la capacidad del modelo en describir con fidelidad el proceso de secado (PANCHARIYA et al., 2002).

Observando esa tabla los resultados de los coeficientes de determinación ajustados (R^2), los errores medios relativos (EMR) y de los errores medios estimados (EME) indican que el modelo Page y Page modificado son los que mejor describen el proceso de secado de tomillo, independientemente de la temperatura de la temperatura del aire de secado. Por lo tanto, el modelo de Page fue el que mejor se ajusta a los datos experimentales entre los 12 modelos, ya que presentó los mayores valores de coeficiente de determinación (99,67 a 99,99%), menores valores de errores medios relativos (1,29 a 9,92%) y menores errores medios estimados obtenemos.

En la tabla 03 son presentados los valores de los parámetros para el modelo de Page, para el secado de las hojas de tomillo en diferentes temperaturas.

Tabla 03. Valores estimados de los parámetros para el modelo de Page para el secado de las hojas de tomillo a diferentes temperaturas de aire.

Temperatura (°C)	Coeficientes	
	K	N
30	0,007425	0,741418
40	0,009278	0,784596
50	0,010665	0,897544
60	0,012407	1,157269
70	0,015156	1,399052

Las ecuaciones para estimar los parámetros “k” y “n” del modelo de Page en función de la temperatura del aire de secado son representadas a continuación:

$$k = 0,0052 + 0,0000325 * T - 0,0000015 * T^2 \quad R^2 = 0,95$$

$$n = 0,1520 + 0,0169 * T \quad R^2 = 0,96$$

Podemos observar en la tabla 03 que los valores de “k” y “n” aumentan en función del incremento de la temperatura del aire de secado. El parámetro “n” depende de la naturaleza del producto y de las condiciones de secado, evidenciando la resistencia interna del producto al proceso de secado (MISRA & BROOKER, 1980).

El secado de tomillo (*Thymus vulgaris*) fue realizada por Doymaz (2010) utilizando temperatura del aire de secado en el rango de 40 a 60°C, velocidad del aire de 2 m s⁻¹ y la humedad relativa de 14 a 45%. Fueros utilizados varios modelos matemáticos a los datos experimentales, mostrándose como el modelo de Midilli et al. El que mejor se ajustaba a los datos experimentales.

Para el secado de las hojas Louro (*Laurus nobilis* L.), Demir et al. (2004) utilizan diferentes métodos de secado (aire a 40,50 y 60°C, secado a sol y sombra). Entre los diversos modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales, tenían como resultado que el modelo de Page fue el que mejor describía el proceso de secado para las condiciones estudiadas. En el estudio realizado con hojas de alecrim (*Rosmarinus officinalis* L), Arslan e Ozcan (2008) utilizaban 3 métodos de secado (a sol con temperaturas en un rango de 20 a 30 °C, estufa a 50 °C y en microondas a 700W). Los autores verificaban que el modelo logarítmico, Midilli y Kuçuk fueron los más adecuados para describir el proceso de secado realizado mediante el sol y en la estufa, mientras que los modelos de Page, Page Modificado, Midilli y Kuçuk fueron los que mejor se ajustaban a los datos experimentales de secado con el microondas.

Al estudiar el secado de las hojas de endro (*Anethum graveolens* L.) y salsinha (*Petroselinum crispum* L.), Doymaz et al. (2006) emplearon 3 temperaturas de aire de secado (50, 60 y 70°C) y una velocidad del aire de 1,1 m s⁻¹. Los valores fueron ajustados a los modelos de Midilli, kuçuk, Page, Lewis y Henderson e Pabis. Concluirían que el modelo Midilli y Kuçuk describían satisfactoriamente la cinética de secado para ambas plantas.

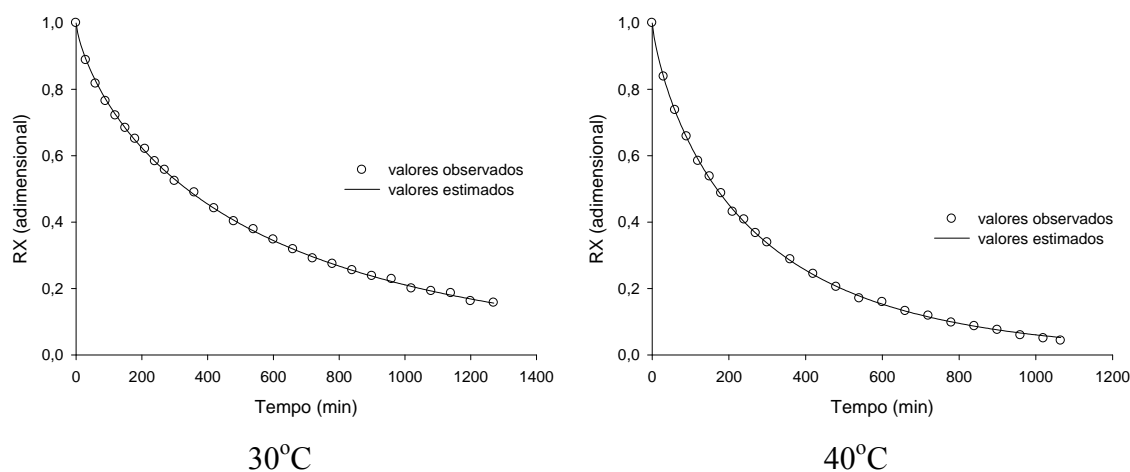
Con el objetivo de ajustar diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales de secado, Barbosa et al (2007) sometieron a las hojas de erva-cidreira (*Lippia alba*) a secado con temperaturas de aire de secado de 40, 50, 60, 70, y 80°C y una velocidad de 0,29+0,03 m.s⁻¹. Los autores concluirían que los modelos de Page y Midilli et al. Fueron los que representaban mejor a cinética de esta especie medicinal. Doymaz (2009) utilizaría temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C y una velocidad de aire de 1,2 m s⁻¹ con el objetivo de estudiar el secado de las hojas de espinafre (*Spinacia*

oleracea L.). Los datos experimentales fueron ajustados a 4 modelos (Henderson e Pabis, Lewis, Page y logarítmico) siendo el modelo logarítmico el que mejor se ajustó a los datos experimentales.

Se han estudiado diferentes tipos de mentas respecto a su secado. En el secado de *Mentha crispera* L., usando temperaturas de aire de 30, 40 e 50°C Park et al. (2002) obtuvieron el mejor ajuste de los datos con el modelo de Page. Therdthai e Zhou (2009) estudiaron el secado de *Mentha cordifolia* utilizando microondas al vacío y aire a 60 y 70°C. Los autores utilizaron los modelos de Lewis, Page y Fick a los datos experimentales de secado y concluirían que el modelo de Page fue el que mejor describe esos datos. Arslan et al. (2010) utilizaron 3 métodos de secado (sol, microondas y aire a 50°C) en hojas de *Mentha x piperita* L. fueron estudiados doce modelos matemáticos y su resultado fue que los mejores ajustes a los datos experimentales fueron obtenidos mediante los modelos Midilli et al., Page e Page Modificado.

Radünz et al. (2011) utilizó seis temperaturas de aire de secado (40, 50, 60, 70, 80 e 90°C), con el objetivo de estudiar la cinética de secado de de carqueja (*Baccharis trimera*). Los autores ajustaban los datos experimentales a doce modelos matemáticos, concluyendo que el modelo de Midilli et al. presentó el mejor ajuste a los datos para el rango de temperatura estudiado (40 a 90°C), y el modelo de Page presentó un ajuste adecuado a los datos experimentales para el rango de temperatura de 60 a 90°C.

En la **figura 05**, son representadas las curvas de secado elaboradas con los valores observados y estimados por la ecuación de Page, para las hojas de tomillo:



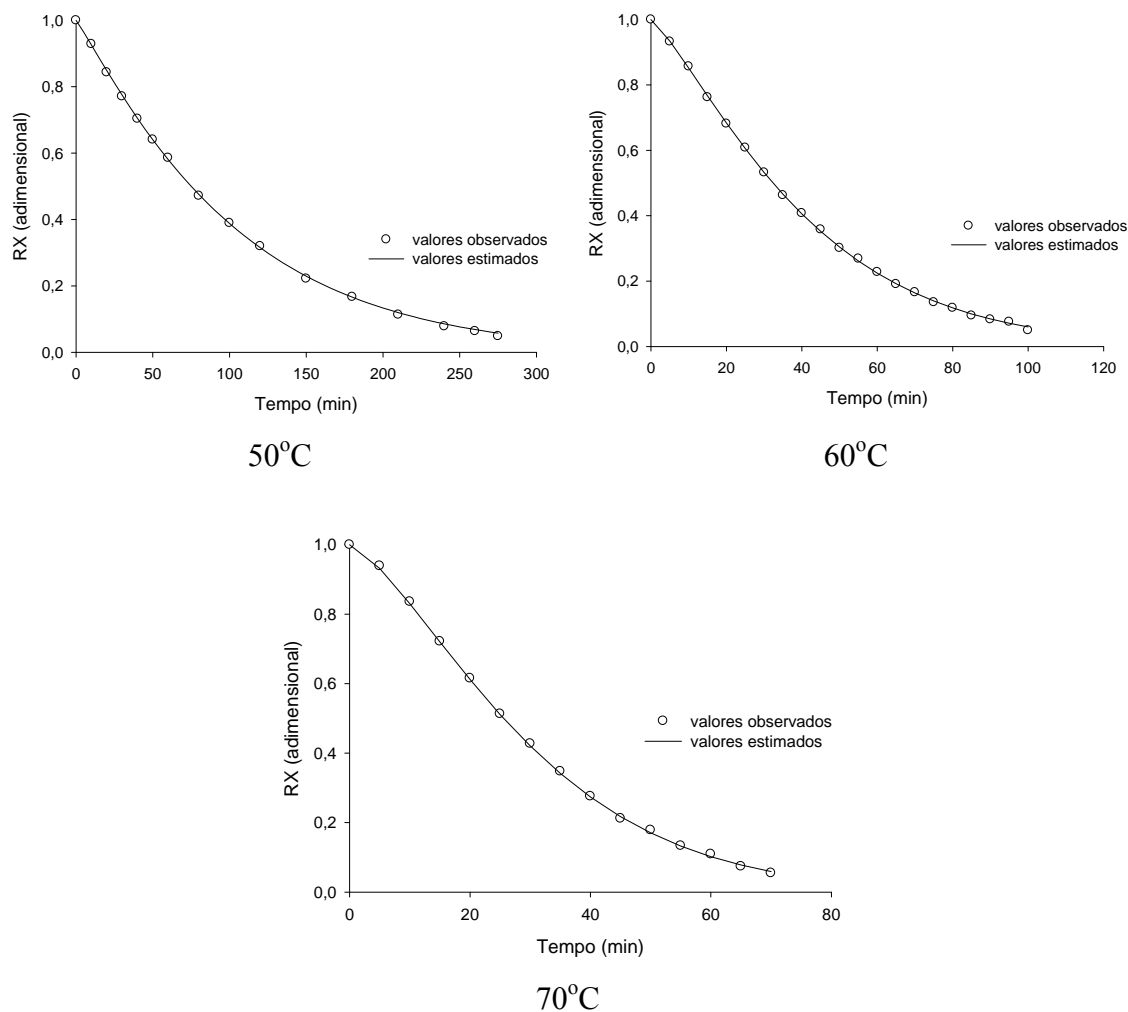


Figura 05. Curvas de secado de tomillo a 30°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70°C ajustadas por el modelo de Page.

Como podemos observar en la figura 05 el secado realizado a 30 °C fue el que más tiempo tardó en secarse. A pesar del largo tiempo de secado en esa temperatura (1270 minutos), las hojas de tomillo no alcanzaron la cantidad de agua final deseada (10% b.u.), entrando en equilibrio con el aire de secado cuando estas alcanzaron una cantidad de agua del 37,6% b.u. Para los demás tratamientos de secado (40, 50, 60 e 70°C) la cantidad de agua final fue de 10,71; 9,91; 8,99 e 8,80% b.u., respectivamente.

El tiempo de secado para la temperatura de 40°C fue de aproximadamente de 1065 minutos. Al aumentar de 40 a 50 °C, este tiempo fue reducido a 275 minutos (reducción del 74,18%). El tiempo de secado fue reducido de 275 para 100 minutos

cuando pasamos de 50 a 60°C (reducción del 63,64%). Y cuando la temperatura de secado fue aumentada de 60 para 70°C, el tiempo fue reducido en 70 min (reducción de 30%).

CONCLUSIONES

Considerando las condiciones en el que el trabajo fue realizado, y teniendo en cuenta los objetivos y resultados obtenidos, llegamos a las siguientes conclusiones:

- El modelo de Page fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales para describir la cinética de secado de las hojas de tomillo.
- Para el secado de las hojas de tomillo, los valores de los coeficientes de difusividad efectiva variaron entre $3,689 \times 10^{-12}$ e $1,190 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el rango de temperatura estudiada;
- Los valores de energía de activación para la difusión del agua en el secado de tomillo $77,16 \text{ kJ mol}^{-1}$, en las condiciones estudiadas;

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. New BET type multi-layer sorption isotherms - Part II: Modelling water sorption in foods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, v.22, n.4, p.192-195, 1989.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. **International Journal of Food Science and Technology**, v.40, n.3, p.1-9, 2005.

ANDRADE, E.T.; BORÉM, F.M.; HARDOIM, P.R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.1, n.7, p.37-43, 2003.

ARSLAN, D.; OZCAN, M. M.; MENGES, H. O. Evaluation of drying methods with respect to drying parameters, some nutritional and colour characteristics of peppermint (*Mentha x piperita* L.). **Energy Conversion and Management**, v.51, p.2769–2775, 2010.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.323-330, 2002.

BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.449-458, 2004.

BAGAMBOULA, C.F., UYTENDAELE, M., DEBEVERE, J. Inhibitory effect of thyme and basil essential oils, carvacrol, thymol, estragol, linalool and *p*-cymene towards *Shigella sonnei* and *S. flexneri*. **Food Microbiology**. V.21 (1), p.33–42, 2004.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P. da; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thinlayer drying of brazilian lemon-scented

verbena leaves (*Lippia alba* (mill) n.e. brown). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, n.1, p.71-80, 2007.

BERBERT, P. A., MELO, E. C., ALVARENGA, R. C., SOUZA, E. F. Contenido de humedad de equilibrio. In. VI Congreso Argentino de Ingeniería Rural – Cadir 2000, Buenos Aires, **Proceedings** in CD-ROM, Buenos Aires Editorial Facultad de Agronomía, 2000.

BIZZO, H. R.; HOVELL, A. M. C.; REZENDE, E. C. M. Óleos essenciais no Brasil: aspectos gerais, desenvolvimento e perspectivas. **Química Nova**, v.32, n.3, p.588-594, 2009.

BRAGA, S. O uso sustentável da biodiversidade amazônica. In: VELLOSO, J.P.R.; ALBUQUERQUE, R.C. **Amazônia vazia de soluções?: Desenvolvimento moderno baseado na biodiversidade**. Rio de Janeiro, José Olympio, 2002

BROOKER, D.B.; BAKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oil seeds**. New York: AVI Book Pub., 1992, 450p.

BRUCE, D.M. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, p.337-348, 1985.

CASTRO, L. O.; CHEMALE, V. M. **Plantas medicinais: condimentares e aromáticas**. Guairá: Agropecuária, 1995.194 p.

CENTENO, S.; CALVO, M. A.; ADELANTADO, C.; FIGUERO, S. Antifungal activity of extracts of *Rosmarinus officinalis* and *Thymus vulgaris* against *Aspergillus flavus* and *A. ochraceus*. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v.13, n.9, p.452-455, 2010.

CHRISTENSEN, C.M.; KAUFMANN, H.H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. **Storage of cereal grain and their products**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1974.

CORRÊA, P.C.; AFONSO Jr, P.C.; MARTINS, P.M.; MELO, E. C.; RADUNZ, L.L. Modelo matemático para representação da higroscopicidade de plantas medicinais. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 27, n. 01, 2002.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* l.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.501-507, 2007.

DAFERERA, D.J., ZIOGAS, B.N., POLISSIOU, M.G. CG/EM analysis of essential oils from some Greek aromatic plants and their fungitoxicity on *Penicillium digitatum*. **Journal Agriculturae Food Chemistry**. V. 48, p. 2576–2581, 2000.

DEMIR, V.; GUNHAN, T.; YAGCIOGLU A. K.; DEGIRMENCIOGLU, A. Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 3, p. 325-335, 2004.

DORMAN, H. J. D.; PELTOKETO, A.; HILTUNEN, R; TIKKANEN, M. J. Characterization of the antioxidant properties of de-odourised aqueous extracts from selected Lamiaceae herbs. **Food Chemistry**, v. 83, n.2, p. 255-262, 2003.

DOYMAZ, I. Drying characteristics and kinetics of okra. **Journal of food Engineering**, v.1, n.69, p.275-279, 2005.

DOYMAZ, I. The Kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.243-248, 2007a.

DOYMAZ, I. Drying of thyme (*thymus vulgaris* L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.1, p.1-8. 2010.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v.32, p.112–125, 2009..

DOYMAZ, I.; TUGRUL, N.; PALA, M. Drying characteristics of dill and parsley leaves. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 3, p. 559-565, 2006.

ECHEVERRIGARAY, G., AGOSTINI, G., TAI-SERFENI, L., PAROUL, N., PAULETTI, G.F., ATTI DOS SANTOS, A.C. Correlation between the chemical and genetic relationships among commercial thyme cultivars. **Journal Agriculturae Food Chemistry**. V. 49, p. 4220 - 4223, 2001.

FARIAS, M.R. Avaliação da qualidade de matérias-primas vegetais. In: SIMÕES C. M. O. et al. Farmacognosia: da planta ao medicamento. 5 ed. Porto Alegre/Florianópolis: Editora da UFRGS/Editora de UFSC, 2003. 1104 p.

FENNELL, C.W.; LIGHT, M.E.; SPARG, S.G.; STAFFORD, G.I.; STADEN, J.V. Assessing African medicinal plants for efficacy and safety: agricultural and storage practices. **Journal of Ethnopharmacology**, v.9, p.113-121, 2004.

HAJIMEHDIPOOR, H.; SHEKARCHI, M.; KHANAVI, M.; ADIB, N.; AMRI, M. A validated high performance liquid chromatography method for the analysis of thymol and carvacrol in *Thymus vulgaris* L. volatile oil. **Pharmacognosy Maganize**, v.6, n.23, p.154-158, 2010.

HENDERSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v.6, n.3, p.169-174, 1961.

HENDERSON, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transactions of ASAE**. v.17, p.1167-1172, 1974.

HIGES, M., LLORENTE, J. Ensayo de la eficacia del timol en el control de la varroasis de *Apis mellifera* en colmenas en produccion. In: **Agricultura Ecológica y Desarrollo Rural**. II Congreso de la Sociedad Espanola de Agricultura Ecológica. Pamplona-Iruna, Setembro, 1996.

HU, F.B; WILLETR, W.C. Optimal chets for prevention of coromary heart disease. **Journal of American Medical Association**, v. 288, n.20, p.2569-2578, 2002.

HUDAIB, M., SPERONI, E., PIETRA, A.M.D., CAVRINI, V. CG/EM evaluation of thyme (*Thymus Vulgaris* L.) oil composition and variations during the vegetative cycle. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**. V. 29 p. 691–700, 2002.

KARATHANOS, V. T. Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v.39, p.337-344, 1999.

KASSEM, A. S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. **In 13th International Congress on Agricultural Engineering**, v.6. p.2-6, Morocco, 1998.

KEEY, R.B. **Drying: principles and practice**. New York: Pregoman Press. 1972.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, London, v.61, n.2, p.173-9, 2004.

LEWIS, W.K. The rate of drying of solids materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427 – 432, 1921.

LISI, A.; TEDONE, L.; MONTESANO, V.; SARLI, G.; NEGRO, D. Chemical characterisation of Thymus populations belonging from southern Italy. **Food Chemistry**, v.125, p.1284–1286, 2011.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. de A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 1996.

MARTINS, E. R., CASTRO, D. M., CASTELLANI, D. C., DIAS, J. E. **Plantas medicinais**. Viçosa:UFV, 1994. 220p.

MENDONÇA, D. Fitoterápicos - nosso verde vale ouro. **Pharma Business**, Maio/Junho, 2002. p. 24-30 Disponível em: <www.abifito.com.br> Acesso em: 15 agosto de 2003.

MEWES, S.; KRUGER, H.; PANK, F. Physiological morphological chemical and genomic diversities of different origins of thyme (*Thymus vulgaris* L.). **Genetic Resources Crop Evolution**, v.55, p.1303-1311, 2008.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; VAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.5, p. 1254 – 1260, 1980.

MOHAPATRA, D. e P. S. RAO. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. 66(4): 513-518, 2005.

NOVACOSK, R.; TORRES, R. S. A. Atividade antimicrobiana sinérgica entre óleos essenciais de lavanda (*Lavandula officinalis*), melaleuca (*Melaleuca alternifolia*), cedro (*Juniperus virginiana*), tomilho (*Thymus vulgaris*) e cravo (*Eugenia caryophyllata*). **Revista Analytica**, n.21, p.36-39, 2006.

OVERHULTS, D. D.; WHITE, G. M.; HAMILTON, M. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.2, p.195-200, 1973.

OZCAN, M.; CHALCHAT, J. C. Aroma profile of *Thymus vulgaris* L. growing wild in Turkey. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, v.30, n.3. p. 68-73, 2004.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.225-233, 1999.

PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Indiana, EUA. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Purdue, 1949.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349 – 357, 2002.

PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; SILVA, J.E.A.R. Estudo comparativo de secagem de cebolinha (*Allium* sp. Cv. Galega) utilizando secadores vertical e horizontal. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.16, n.2; p.143-145, 1996.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v, 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**. v. 51, n. 3, p. 193 – 199, 2002.

PORTE, A., GODOY, R. L. O. Alecrim (*Rosmarinus Officinalis* L.): Propriedades Antimicrobiana e Química do Óleo Essencial. **Boletim CEPPA**. V. 19, n. 2, p. 193-210, jul./dez. 2001.

PORTE, A.; GODOY, R. L. O. Chemical composition of *Thymus vulgaris* L. (thyme) essential oil from Rio de Janeiro state (Brazil). *Journal of the Serbian Chemical Society*, v.73, n.3, p.307-310, 2008.

RADÜNZ, L. L.; AMARAL, A. S.; MOSSI, A. J.; MELO, E. C.; ROCHA, R. P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, v.19, n.1, p.19-27, 2011.

REIS, M. S.; MARIOT, A.; STEENBOCK, W. Diversidade e domesticação de plantas medicinais. In: SIMÕES, C.M.O *et al.* **Farmacognosia: da planta ao medicamento**. 5.ed. Porto Alegre/Florianópolis: Editora UFRGS/ Editora UFSC, 2003. p. 43-74.

RONYCELY PEREIRA DA ROCHA. Avaliação da teor e qualidade do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento, 2011.

SHAN, B.; CAI, Y. Z.; SUN, M.; CORKE, H. Antioxidant capacity of 26 spice extracts and characterization of their phenolic constituents. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 53, n. 20, p. 7749-7759, 2005.

SHARAF-ELDEN, Y. I., BLAISDELL, J. L., & HAMDY, M. Y. A model for ear corn drying. **Transactions of the ASAE**, v.5, p.1261-1265, 1980.

SILVA, F.; CASALI, V.W.D. **Plantas medicinais e aromáticas: pós-colheita e óleos essenciais**. Viçosa, MG: UFV, DFT, 2000.

SILVA, F. da; CASALI, V.W.D. **Plantas medicinais e aromáticas: pós-colheita e óleos essenciais**. Viçosa, MG: UFV, DFT, 2000.

SIMAL, S.; FEMENÍA, A.; LLULL, P.; ROSSELLÓ, C. Dehydration of aloe vera: simulation of drying curves and evaluation of functional properties. **Journal of Food Engineering**, v. 43, p. 109 - 114, 2000.

SOKHANSANJ, S.; YANG, W. Revision of the ASAE standard D245.4: moisture relationships of grains. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 39, n.2, 1996.

SOKOVIĆ, M. D.; VUKOJEVIĆ, J.; MARIN, P. D.; BRKIĆ, D.; VAJS, V.; VAN GRIENSVEN, L. J. L. D. Chemical composition of essential oils of *thymus* and *mentha* species and their antifungal activities. *Molecules*, v.14, p.238-249, 2009.

SOYSAL, Y., OZTEKIN, S. Comparison of seven equilibrium moisture content equations for some medicinal and aromatic plants. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v. 78, n. 1, 2001.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W. *Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (Mentha cordifolia Opiz ex Fresen)*. **Journal of Food Engineering**, v.91, p.482-489, 2009.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – a new model. **Transactions of ASAE**, v.11, p.582-586, 1968.

TOGRUL, I.T.; PEHLIVAN, D. Modelling of drying kinetics of single apricot. **Journal of Food Engineering**, v.58, p.23-32, 2003.

ANEXO

Tabla 04. Valores de los coeficientes de determinación (R^2), errores medios relativos (EMR) y de los errores medios estimados (EME), obtenidos para los modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de secado de las hojas de tomillo.

Modelo matemático	Temp. (°C)	EMR (%)	EME	R^2 (%)	Modelo matemático	Temp. (°C)	EMR (%)	EME	R^2 (%)
Midilli et al.	30	5,53	0,0151	99,754	Henderson & Pabis modificado	30	2,71	0,0171	99,685
	40	59,73	0,0840	92,817		40	9,01	0,0187	99,658
	50	8,32	0,0359	98,983		50	2,65	0,0113	99,900
	60	0,78	0,0039	99,991		60	7,14	0,0219	99,744
	70	11,18	0,0115	99,910		70	60,28	0,0533	98,897
Page	30	2,21	0,0119	99,847	Aprox. a la difusión	30	4,88	0,0300	99,017
	40	9,42	0,0193	99,672		40	10,61	0,0089	99,922
	50	1,29	0,0033	99,991		50	1,53	0,0065	99,966
	60	2,50	0,0077	99,964		60	9,19	0,0268	99,594
	70	9,92	0,0143	99,949		70	19,73	0,0184	99,861
Lewis	30	9,67	0,0408	98,159	Thompson	30	5,61	0,0192	99,597
	40	13,62	0,0424	98,195		40	48,69	0,0449	97,980
	50	5,46	0,0180	99,730		50	2,53	0,0073	99,956
	60	9,20	0,0254	99,594		60	21,13	0,0557	97,736
	70	72,11	0,0569	98,487		70	81,47	0,0645	98,160
Exponencial de dos términos	30	4,69	0,0208	99,524	Wang & Sing	30	12,52	0,0517	97,039
	40	19,00	0,0210	99,560		40	50,16	0,7972	93,491
	50	0,07	0,0048	99,981		50	13,58	0,0376	99,884
	60	11,52	0,0354	99,251		60	7,24	0,0190	99,785
	70	75,16	0,0617	98,320		70	10,19	0,0194	99,835
Dos términos	30	2,47	0,0169	99,687	Page modificado	30	2,33	0,0148	99,762
	40	8,53	0,0201	99,602		40	9,43	0,0194	99,672
	50	2,52	0,0111	99,900		50	1,29	0,0033	99,991
	60	7,18	0,0213	99,744		60	2,50	0,0077	99,974
	70	60,28	0,0516	98,897		70	9,93	0,0143	99,949
Henderson & Pabis	30	2,69	0,0169	99,686	Logarítmico	30	2,80	0,0152	99,749
	40	8,98	0,0186	99,658		40	13,13	0,0192	99,637
	50	2,66	0,0110	99,900		50	3,62	0,0095	99,928
	60	7,17	0,0207	99,744		60	1,27	0,0055	99,983
	70	60,28	0,0501	98,897		70	33,90	0,0284	99,666

