






Cinética del secado de las hojas de las especies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae)

Leaves drying kinetics of the species *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) and *Melampodium divaricatum* (Asteraceae)

Cinética da secagem das folhas das espécies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) e *Melampodium divaricatum* (Asteraceae)

Enrique Ruiz Reyes^{1*}, Ricardo Baquerizo-Crespo², Michael Aníbal Macías Pro³, María José Pin Molina⁴ y Yesther Marisol Pita Gavilanes⁴

Universidad Técnica de Manabí, Av. Urbina y Che Guevara, CP 130105, Portoviejo, Manabí, Ecuador. ¹Instituto de Ciencias Básicas. Correo electrónico: enrique.ruiz@utm.edu.ec, . ²Departamento de Procesos Químicos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Correo electrónico: ricardo.baquerizo@utm.edu.ec, . ³Laboratorio de Análisis Químicos y Biotecnológicos. Instituto de Investigación. Correo electrónico: michael.macias@utm.edu.ec, . ⁴Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Correo electrónico: (MP) mariajosepinmolina0107@gmail.com,  (YP) yesthermarisolpitagavilanes@gmail.com .

Resumen

El estudio del secado de las plantas es importante para los métodos de extracción de los principios activos, ya que brinda beneficios tanto para la eficiencia como para la estabilidad de los mismos. El objetivo de la presente investigación es estudiar la cinética de secado de las hojas de las especies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) de la provincia de Manabí. Se emplearon 8 modelos empíricos derivados de la ley de Fick con ajuste y el software STATISTICA como modelador. El modelo se realizó mediante la aplicación de la curva de ajuste de ORIGIN Pro. Los resultados de la cinética fueron obtenidos experimentalmente en un secador de túnel a escala de laboratorio con una temperatura de 40°C, a 1 atm de presión y una velocidad de aire de 8,47 m.s⁻¹. Para la determinación del modelo que

Recibido: 29-01-2020 • Aceptado: 31-03-2021.

*Autor de correspondencia. Correo electrónico: enrique.ruiz@utm.edu.ec

mejor se ajusta a los datos experimentales se apoya en el coeficiente de correlación (R^2), error cuadrático medio (E_{RMS}) y chi-cuadrado (X^2). El modelo matemático que mejor describe el proceso de secado es el logarítmico para *Zanthoxylum sprucei* y el modelo de Wang y Singh para *Melampodium divaricatum*.

Palabras claves: Extracción de humedad, cinética de secado, modelos matemáticos, ley de Fick.

Abstract

The study of the drying of the plants is important for the extraction methods of the active principles, since it provides benefits both for the efficiency and for the stability. The objective of this research is to study the drying kinetics of the leaves of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) and *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) species from the Manabí province. Eight empirical models derived from Fick's law with adjustment and the STATISTICA software as modeler was used. The model was made by applying the ORIGIN Pro fit curve. The kinetic results were obtained experimentally in a laboratory scale tunnel dryer with a temperature of 40°C, at 1 atm of pressure and a speed air of 8.47 m.s⁻¹. To determine the model that best fits the experimental data, it relies on the correlation coefficient (R^2), mean square error (ERMS) and chi-square (X^2). The mathematical model that best describes the drying process is the logarithmic for *Zanthoxylum sprucei* and the Wang and Singh model for *Melampodium divaricatum*.

Keywords: Moisture extraction, drying kinetics, mathematical models, Fick's law.

Resumo

O estudo da secagem das plantas é importante para os métodos de extração dos princípios ativos, pois proporciona benefícios tanto pela sua eficiência quanto pela sua estabilidade. O objetivo desta pesquisa é estudar a cinética de secagem das folhas das espécies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) e *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) da província de Manabí. São utilizados 8 modelos empíricos derivados da lei de Fick com posterior ajuste e o software STATISTICA como modelador. O modelo é feito aplicando-se a curva de ajuste ORIGIN Pro. Os resultados cinéticos são obtidos experimentalmente em um secador de túnel em escala de laboratório com temperatura de 40 °C, a 1 atm de pressão e velocidade do ar 8,47 m.s⁻¹. Para determinar o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais, ele se baseia no coeficiente de correlação (R^2), erro quadrático médio (ERMS) e qui-quadrado (X^2). O modelo matemático que melhor descreve o processo de secagem é o logarítmico para *Zanthoxylum sprucei* e o modelo de Wang e Singh para *Melampodium divaricatum*.

Palavras-chave: Extração de umidade, cinética de secagem, modelos matemáticos, lei de Fick.

Introducción

La etnobotánica tiene como objetivo la búsqueda del conocimiento y rescate del saber botánico tradicional, particularmente relacionado al empleo de la flora (Fernández *et al.*, 2012). En el Ecuador existe una gran variedad de plantas silvestres las cuales cuentan con un extenso uso medicinal (Salibová, 2021). En este sentido el estudio preliminar fitoquímico del contenido fenólico total y la actividad antibacteriana de trece especies nativas del país (Rondón *et al.*, 2018), muestra como transformar el conocimiento tradicional en científico.

Las especies vegetales *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) y *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) crecen en América del Sur y se emplean como plantas medicinales para combatir distintas enfermedades. La *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) es conocida popularmente como flor de caléndula falsa, amarilla pequeña estrella, o flor dorada (Lorenzi, 2008). El té de sus hojas e inflorescencias se usa comúnmente en medicina popular (Adegbite *et al.*, 2019). También toda la planta es empleada popularmente como curativa, diaforética (Neto y Chagas, 2001), diurética y en el tratamiento de la leucorrea (Agra *et al.*, 2007). Es nativa de América del Sur y es una especie de maleza moderadamente frecuente en casi todo el país, donde infesta principalmente cultivos anuales, huertos, cafetales y bordes de carreteras (Lorenzi, 2008). Además, en Brasil investigadores publican la actividad antibacteriana

Introduction

The objective of ethnobotany is the search for knowledge and rescue of the traditional botanical knowledge, particularly related to the use of flora (Fernández *et al.*, 2012). In Ecuador, there is a big variety of wild plants, which have an extensive medicinal use (Salibová, 2021). In this sense the preliminary phytochemical study of the total phenolic content and antibacterial activity of thirteen native species of the country (Rondón *et al.*, 2018), shows how to transform traditional knowledge into scientific.

The plant species of *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) and *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) grow in South America and they are used as medicinal plants to combat various diseases. *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) is popularly known as false marigold flower, small yellow star, or golden flower (Lorenzi, 2008). The tea of its leaves and inflorescences is commonly used in folk medicine (Adegbite *et al.*, 2019). Also all the plant is popularly used as curative, diaphoretic (Neto and Chagas, 2001), diuretic and in the treatment of leucorrhea (Agra *et al.*, 2007). It is native from South America and is a moderately frequent weed species in most of the country, where it mainly infests annual crops, orchards, coffee plantations and roadsides (Lorenzi, 2008). In addition, in Brazil, researchers publish the antibacterial and antileishmanial activity of essential oils from *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) (Pelissari *et al.*, 2010; Moreira, *et al.*, 2019).

y antileishmanial de los aceites esenciales de la *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) (Pelissari *et al.*, 2010; Moreira, *et al.*, 2019).

Binutu y Cordell (2000), estudian los constituyentes químicos de las hojas de las especies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y reportan distintos tipos de actividades biológicas como son: larvicida, antiinflamatorias, analgésicas, antioxidante, anticancerígena, antimicrobiano y antifúngico (Tiwary *et al.*, 2007). Además, (Graham *et al.*, 2003) reportan la evaluación antimicrobiana de las hojas de esta especie en Perú, y aíslan el triterpeno lupeol y la sesamina flavanona responsables de esta actividad.

Para el procesamiento de especies vegetales es imprescindible el secado, que es un método de conservación basado en la disminución de la humedad para prolongar su período de vida útil (García *et al.*, 2007). Otras ventajas del mismo son la reducción de peso y volumen, lo cual facilita el transporte y almacenamiento (Helen *et al.*, 2003).

De acuerdo a Can (2000) el proceso de secado se realiza en dos etapas, en la primera etapa, el material se encuentra puro y la operación ocurre en la superficie del material a una velocidad constante. La masa del agua evaporada no es afectada por las condiciones del material. En la segunda etapa, la velocidad de secado decrece debido a que se extrae humedad contenida en el interior de la materia. Esta etapa está delimitada por las propiedades del material.

Binutu and Cordell (2000), study the chemical constituents of the leaves of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) species, and they report different types of biological activities such as larvicidal, anti-inflammatory, analgesic, antioxidant, anticancer, antimicrobial and antifungal (Tiwary *et al.*, 2007). In addition, (Graham *et al.*, 2003) report the antimicrobial evaluation of the leaves of this species in Peru, and isolate the triterpene lupeol and sesamin flavanone responsible for this activity.

For the processing of plant species, the drying is essential, which is a preservation method based on the reduction of humidity to prolong their useful life (García *et al.*, 2007). Other advantages of it, is the reduction of weight and volume, which facilitates transport and storage (Helen *et al.*, 2003).

According to Can (2000) the drying process is made in two stages, in the first stage, the material is pure and the operation occurs on the surface of the material at a constant speed. The mass of the evaporated water is not affected by the material conditions. In the second stage, the drying speed decreases due to the moisture contained inside the material is extracted. This stage is delimited by the properties of the material.

For the design of the drying operation, the speed with which moisture is extracted from a material is analyzed; this is made through a kinetic study. Through the drying kinetics, the curves are obtained and they relate the moisture of the material with time and other variables

Para el diseño de la operación de secado se analiza la velocidad con la que se extrae la humedad de un material, esto se realiza por medio del estudio cinético. Por medio de la cinética de secado se obtienen curvas que relacionan la humedad de la materia con el tiempo y otras variables como temperatura, tamaño de partículas, entre otras, lo cual permite realizar el diseño o la selección del sistema de secado (Bellagha *et al.*, 2002).

En la actualidad existen herramientas tecnológicas que mediante modelos definidos que se derivan generalmente de la ley de enfriamiento de Newton y la segunda ley de difusión de Fick (Kumar *et al.*, 2012). Estos modelos cuantifican la humedad presente en la materia durante el proceso de secado (Erbay y Icier 2010); la literatura especializada presenta varios ejemplos de estudios cinéticos de secado: café pergamino (Rattanamechaiskul, 2020), yerba mate (Holowaty *et al.*, 2018), romero (Ali *et al.*, 2020) y ortiga y menta (Kaya y Aydın, 2009). Los objetivos de los estudios cinéticos son variados: evaluar coeficientes térmicos para la disminución de costos de operación, comparar métodos de secado a partir de la evaluación de cambios en las propiedades de las especies vegetales y evaluar constantes cinéticas (Arslan y Özcan, 2008).

Se planteó el objetivo de analizar la cinética de secado de las hojas de las especies *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae), debido a su potencial biotecnológico, considerándose la importancia del secado en la conservación de estas especies vegetales.

such as temperature, particle size, among others, which allows to perform the design or selection of the drying system (Bellagha *et al.*, 2002).

Currently, there are technological tools that use defined models generally derived from Newton's cooling law and Fick's second diffusion law (Kumar *et al.*, 2012). These models quantify the moisture present in the material during the drying process (Erbay and Icier 2010); the specialized literature presents several examples of drying kinetic studies: parchment coffee (Rattanamechaiskul, 2020), yerba mate (Holowaty *et al.*, 2018), rosemary (Ali *et al.*, 2020) and nettle and mint (Kaya and Aydın, 2009). The objectives of kinetic studies are varied: to evaluate thermal coefficients for decreasing operating costs, to compare drying methods from the evaluation of changes in plant species properties, and to evaluate kinetic constants (Arslan and Özcan, 2008).

The objective was to analyze the drying kinetics of the leaves of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) and *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) species, due to their biotechnological potential, considering the importance of drying in the conservation of these plant species.

Materials and methods

Obtaining and adequacy of the sample

Leaves of *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) and *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) species were manually collected at the Botanical Garden of the Technical

Materiales y métodos

Obtención y Adecuación de la muestra

Se recolectaron manualmente hojas de las especies *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) y *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) en el Jardín Botánico de la Universidad Técnica de Manabí ubicado en la ciudad de Portoviejo, Ecuador. Se limpió el polvo, suciedad e impurezas que había en las muestras recolectadas, luego se procedió a separar las hojas de las flores y el tallo de las plantas.

Secado de las muestras

Para el secado se utilizó un secador de túnel a escala de laboratorio, a una temperatura constante de 40°C, previsto de un soplador de ¼ HP para forzar el aire de secado con una velocidad constante de 8,47 ms⁻¹, con flujo radial. Un sistema de calefacción de dos resistencias de 110 V recubiertas de acrílico ubicadas a lo largo del túnel de secado; sistema de control automático de temperatura, una bandeja de acero inoxidable de medidas 10 cm x 20 cm x 5 cm. Para medir la variación de peso se empleó una balanza analítica (SARTORIUS-WERKE GMBH tipo 2245) con precisión de 0,001 g y un cronómetro para controlar el tiempo de secado.

Posteriormente, se colocaron las muestras en la bandeja de acero del secador, previo ajuste de la temperatura del equipo. Durante el proceso de secado las muestras son pesadas en intervalos de 5 min. durante los primeros 50 min.

University of Manabí located in the city of Portoviejo, Ecuador. The dust, dirt and impurities that were in the collected samples were cleaned, and then the leaves of the flowers and the stem of the plants were separated.

Drying of the samples

For drying, a laboratory-scale tunnel dryer was used, at a constant temperature of 40°C, equipped with a ¼ HP blower to force the drying air at a constant speed of 8.47 ms⁻¹, with radial flow. A heating system of two 110 V acrylic coated heating elements located along the drying tunnel; an automatic temperature control system, a stainless steel tray measuring 10 cm x 20 cm x 5 cm. An analytical balance (SARTORIUS-WERKE GMBH type 2245) with an accuracy of 0.001 g and a stopwatch to control the drying time were used to measure the weight variation.

Later, the samples were placed on the steel tray of the dryer, after adjusting the temperature of the equipment. During the drying process, the samples were weighed at intervals of 5 min, during the first 50 min of drying and then 3 measurements were made at 100, 150 and 200 min. The gravimetric method was used for moisture determination. At each time interval the sample was weighed and compared with the previous weighing, determining the final drying point when there was no weight variation. This procedure was applied for both *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) and *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) samples.

de secado y luego se realizaron 3 mediciones a 100, 150 y 200 min. Se empleó el método gravimétrico para la determinación de humedad. En cada intervalo de tiempo se pesó la muestra y se comparó con la pesada anterior, determinando el punto final de secado cuando no hubo variación de peso. Este procedimiento se aplicó tanto para la muestra de *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) como de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae).

Modelación matemática de las curvas de secado

El contenido de humedad calculado por medio de la siguiente ecuación, Doymaz, 2014:

$$MR=M/M_0 \text{ (Ecuación 1)}$$

Dónde: M y M_0 son el contenido de humedad a cualquier tiempo ($\text{kg de agua.kg de materia seca}^{-1}$) y la humedad inicial de las muestras ($\text{kg de agua.kg de materia seca}^{-1}$), respectivamente. Para determinar el contenido de agua en función del tiempo de secado se aplicaron nueve (9) modelos matemáticos no lineales que se muestran en el cuadro 1, estos modelos son utilizados por varios autores para describir el secado en capa fina en frutas, legumbres, hojas de té, cárnicos y hongos.

La mayoría de los modelos empleados son funciones de descomposición exponencial que describen el proceso de disminución de humedad en relación al tiempo. Sólo el modelo de Wang y Singh representa una ecuación polinómica de segundo grado, que ofrece una buena predicción de datos experimentales (Doymaz, 2014).

Mathematical modeling of drying curves

The moisture content calculated by using the following equation, Doymaz, 2014:

$$MR=M/M_0 \text{ (Equation 1)}$$

Where: M and M_0 are the moisture content at any time ($\text{kg water.kg dry matter}^{-1}$) and the initial moisture of the samples ($\text{kg water.kg dry matter}^{-1}$), respectively. To determine the water content as a function of drying time, nine (9) nonlinear mathematical models were applied, which are shown in table 1. These models are used by several authors to describe the thin layer drying of fruits, legumes, tea leaves, meat and mushrooms.

Most of the models used are exponential decomposition functions that describe the process of moisture decrease in relation to time. Only the Wang and Singh model represents a polynomial equation of second degree, which offers a good prediction of experimental data (Doymaz, 2014).

Model adjustments were evaluated with the coefficient of determination R^2 . The mean square error (E_{RMS}) and Chi-square (X^2), which represent the difference between values predicted by a model and values observed during experimentation, were also used. High values of R^2 and lower values of (E_{RMS}) and (X^2) are the conditions used for choosing the model that best fits the experimental data.

$$E_{\text{RMS}} = \left[\left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N (M_{R,exp,i} - M_{R,pre,i})^2 \right]^{1/2} \text{ (Equation 2)}$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,exp,i} - M_{R,pre,i})^2}{N-Z} \text{ (Equation 3)}$$

Cuadro 1. Modelos matemáticos de secado.

Table 1. Mathematical models of drying.

<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Referencias</i>
<i>Newton</i>	$MR=e^{-kt}$ (Ecuación 4)	Rocha <i>et al</i> , 2012
<i>Page</i>	$MR=e^{-kt^n}$ (Ecuación 5)	Zhang <i>et al</i> , 2016
<i>Henderson y Pabis</i>	$MR=a e^{-kt}$ (Ecuación 6)	Rosa <i>et al</i> , 2015
<i>Henderson y Pabis modificado</i>	$MR=ae^{-kt}+be^{-gt}+ce^{-ht}$ (Ecuación 7)	Costa y Pereira, 2013
<i>Logarítmico</i>	$MR=ae^{-kt}+c$ (Ecuación 8)	Doymaz, 2012
<i>Dos términos exponenciales</i>	$MR=a e^{-k_1t}+(1-a) e^{-k_2t}$ (Ecuación 9)	Virgen-Navarro <i>et al</i> , 2016
<i>Exponencial de dos términos.</i>	$MR=ae^{-kt}+(1-a)e^{-kat}$ (Ecuación 10)	Ocampo, 2016
<i>Wang y Singh</i>	$MR=1+at+bt^2$ (Ecuación 11)	Doymaz, 2014
<i>Difusión aproximada</i>	$MR=ae^{-kt}+(1-a)e^{-k_1bt}$ (Ecuación 12)	Ismail y Kocabay, 2018

Modificado de Ertekin y Yaldiz (2004) y Pin *et al*, (2009).

k es el coeficiente cinético de pérdida de humedad en s⁻¹; t es el tiempo en s; a, b, c, d ,g y h son coeficientes de ajuste propios de cada modelo.

Modified of Ertekin and Yaldiz (2004) and Pin *et al*, (2009).

k is the kinetic coefficient of moisture loss in s⁻¹; t is the time in s; a, b, c, d, g and h are adjustment coefficients specific to each model.

Los ajustes de los modelos se evaluaron con el coeficiente de determinación R². También se empleó el error cuadrático medio (E_{RMS}) y Chi cuadrado (), los cuales representan la diferencia entre valores predichos por un modelo y los valores observados durante la experimentación. Los altos valores de R² y los valores más bajos de (E_{RMS}) y () son las condiciones que se utilizan para la elección del modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales.

Where: MR_{exp,i} and MR_{pre,i} are experimental and predicted dimensionless moisture ratios, N is the number of observations and Z is the number of constants in the model. The statistical analysis is performed with Statistica software and the fitted curves are plotted with Software Origin Pro 8.

Diffusive coefficient (D_f)

The diffusive coefficient is calculated using the following equation, applied by Roberts *et al*, (2008):

$$E_{RMS} = \left[\left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N (M_{R,exp,i} - M_{R,pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi^2 D_f t}{4l^2} \right] \quad \text{(Equation 13)}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R,exp,i} - M_{R,pre,i})^2}{N-Z} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde: $M_{R,exp,i}$ y $M_{R,pre,i}$ son proporciones de humedad adimensionales experimentales y previstas, N es el número de observaciones y Z es el número de constantes que presenta el modelo. El análisis estadístico se realiza con el Software Statistica y las curvas ajustadas se grafican con el Software Origin Pro 8.

Coefficiente Difusivo (D_f)

El coeficiente difusivo es calculado usando la siguiente ecuación, empleada por Roberts *et al.*, (2008):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[\frac{-\pi^2 D_f t}{4l^2} \right] \quad (\text{Equation 13})$$

Dónde: MR es el contenido de humedad a cualquier tiempo (s), D_f es el coeficiente difusivo (m^2s^{-1}), l es la distancia media desde el exterior de la muestra hasta el interior de la muestra (m). Para calcular el D_f se realiza la linealización de la ecuación 13 aplicando logaritmo neperiano a cada lado de la misma y luego se despeja la variable D_f .

Resultados y discusión

Influencia del aire caliente en la cinética de secado de hojas de *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) y *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae)

En la Figura 1 se grafica la pérdida de humedad con relación al tiempo, el secado sigue un período de velocidad decreciente y esto se ve reflejado en la pérdida de kg agua/kg masa. La pérdida

Where: MR is the moisture content at any time (s), D_f is the diffusive coefficient (m^2s^{-1}), l is the average distance from the outside of the sample to the inside of the sample (m). To calculate D_f , linearization of equation 13 is performed by applying neperian logarithm to each side of the same equation and then the variable D_f is cleared.

Results and discussion

Influence of hot air on the drying kinetics of leaves of *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) and *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae).

In the figure 1, the loss of moisture is plotted in relation to time, and it follows a period of decreasing speed and this is reflected in the loss of kg water / kg mass. The loss of weight in *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) is slightly higher than that of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) at a temperature of 40°C.

It is observed that in the first 30 min of drying, the water evaporation process is high in both samples, later they decrease as the moisture in the plant matrix is released with greater difficulty. These results are in agreement with those obtained in investigations by Coloma-Paxi *et al.*, (2017), Rocha *et al.*, (2012) and Abano *et al.*, (2011) on drying of plant samples. This means that the physical mechanism governs the movement of moisture in the samples is dominated by the diffusion of water vapor or bound water through the dried tissue to the drying air at a slower rate than

de peso en *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) es ligeramente mayor que la de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) a la temperatura de 40°C.

Se observa que en los primeros 30 min. de secado el proceso de evaporación del agua es alta en ambas muestras, posteriormente disminuyen a medida que la humedad de la matriz de las plantas es liberada con mayor dificultad. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en investigaciones realizadas por Coloma-Paxi *et al.*, (201760 and 70 °C), Rocha *et al.*, (2012) y Abano *et al.*, (2011) en secado de muestras vegetales. Esto significa que el mecanismo físico que gobierna el movimiento de la humedad en las muestras está dominado por la difusión de vapor de agua o agua ligada a través del tejido seco al aire de secado a una velocidad más lenta que la velocidad de evaporación de la superficie (Doymaz, 2014).

the evaporation rate from the surface (Doymaz, 2014).

In Figure 2, it is observed that the decreasing period speed is predominant in both samples. There is no induction period prior to drying and a slight period of constant speed is visualized in the sample of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae), when the average critical moisture is in the range of 0.5 to 1. In *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) this period of constant speed is observed when the average critical moisture is in the range of 0.15 to 0.20. In addition, a rebound in drying speed is observed in both samples after the constant speed stage, which is mostly pronounced in *Melampodium divaricatum* (Asteraceae). This phenomenon is very similar to that reported by Abano *et al.*, (2011), in the drying of tomato slices at 50°C; these irregularities are

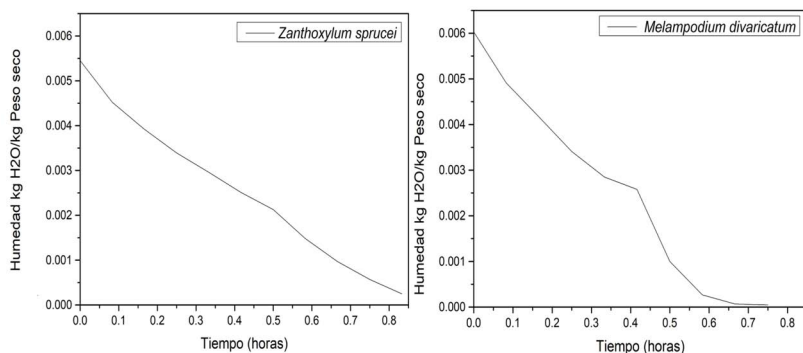


Figura 1. Variación de la proporción de la humedad en función del tiempo de secado de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae).

Figure 1. Variation of the moisture proportion as a function of drying time of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) and *Melampodium divaricatum* (Asteraceae).

En la figura 2, se observa que la velocidad de período decreciente es la que predomina en ambas muestras. No existe ningún período de inducción previo del secado y se visualiza un ligero período de velocidad constante en la muestra de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae), cuando la humedad crítica promedio se encuentra en el intervalo de 0,5 hasta 1. En *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) dicho período de velocidad constante se observa cuando la humedad crítica promedio se encuentra en el intervalo de 0,15 hasta 0,20. Además, se observa un repunte de la velocidad de secado en ambas muestras luego de la etapa de velocidad constante, la cual es mayormente pronunciada en la *Melampodium divaricatum* (Asteraceae). Este fenómeno es muy parecido al reportado por Abano *et al.*, (2011), en el secado de rodajas de tomate a 50 °C; estas irregularidades se deben a que la temperatura con la que se realiza el secado no es la adecuada.

Finalmente, se visualiza que la velocidad de secado seleccionada en ambas plantas empieza a decrecer, lo que está en concordancia con el período en que la velocidad y temperatura suministrada a las muestras en el secador de túnel no es suficiente para extraer las moléculas de agua en su totalidad. Este fenómeno permite que continúen los procesos de transporte y se pueda disminuir aún más la humedad de las muestras, lo que concuerda con los estudios de cinéticas de secado determinadas por Castro *et al.*, (2009); Sandoval-Torres *et al.*, (2006).

due to the inadequate temperature at which drying is performed.

Finally, it is visualized that the selected drying speed in both plants, starts to decrease, which is in accordance with the period in which the speed and temperature supplied to the samples in the tunnel dryer is not enough to extract molecules of water in their totality. This phenomenon allows the transport processes to continue and the moisture content of the samples can be further reduced, which is in agreement with the drying kinetics studies determined by Castro *et al.* (2009); Sandoval-Torres *et al.* (2006).

Mathematical modeling of the drying kinetics

Experimental drying data of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) and *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) are adjusted to the proposed models and the adjustments coefficients are determined for each one. Figures 3 and 4 show the settings for the the 8 mathematical models proposed at 40°C.

Table 2 shows the statistical parameters used for the adjustment of the drying curves of the samples, most of the models present an adjustment which can describe the drying kinetics of each one, however, the selection of the model that presents the best fit is based on the one that obtained lower values of X^2 and E_{RMS} and an R^2 of at least 0.97 as described by the methodology of Doymaz, (2014).

Most of the models used in the *Melampodium divaricatum* samples presented an R^2 lower than 0.97, only 2 of the 8 models applied managed to

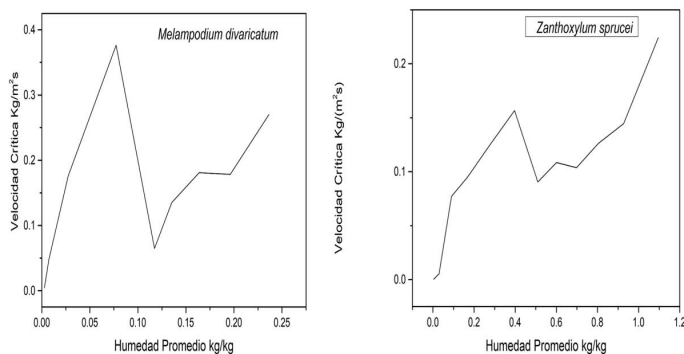


Figura 2. Variación de la velocidad crítica en función de la humedad promedio en el secado de las hojas de las especies *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae).

Figure 2. Variation of the critical speed as a function of average moisture in the drying of the leaves of *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) and *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) species.

Modelación matemática de la cinética de secado

Los datos experimentales de secado de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) y *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) se ajustan a los modelos propuestos y se determinan los coeficientes de ajuste para cada uno. Las figuras 3 y 4 muestran los ajustes para los 8 modelos matemáticos propuestos a 40°C.

En el cuadro 2 se observan los parámetros estadísticos que se utilizan para el ajuste de las curvas de secado de las muestras, la mayoría de los modelos presentan un ajuste el cual pueda describir la cinética de secado de cada una, sin embargo, la selección del modelo que presenta mejor ajuste se basa en aquel que obtuvo menores valores de X^2 y E_{RMS} y un R^2 de como mínimo 0,97 tal como lo describe la metodología de Doymaz, (2014).

fit the experimental data, these being the Logarithmic model and the Wang and Singh model, the latter being the one with the best fit according to the values of X^2 and E_{RMS} , coinciding with the values reported by Salcedo, (2016).

In the modeling of *Zanthoxylum sprucei* only the Wang and Singh and Logarithmic models presented a good fit to the experimental drying data, being this time the Logarithmic model the one that had lower values of X^2 and E_{RMS} , coinciding these results with those obtained for mushroom drying by Doymaz (2014) and yam drying by Montes *et al*, (2008).

Diffusive coefficient (D_f)

The values calculated from the Diffusive coefficient (D_f) are found in the table 3. Even though in the literature there are not values reported from D_f of the studied leaves, these have similar values to those

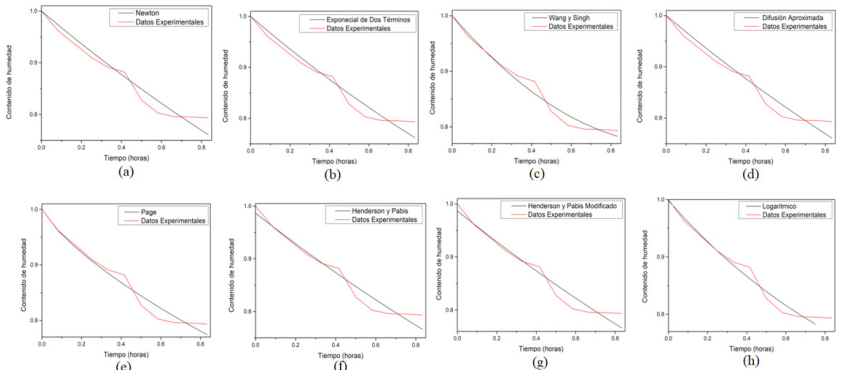


Figura 3. Modelado cinético del secado de *Melampodium divaricatum* (Asteraceae), modelo de Newton (a), modelo Exponencial de Dos Términos (b), modelo de Wang y Singh (c), modelo Difusión Aproximada (d), modelo de Page (e), modelo de Henderson y Pabis (f), modelo de Henderson y Pabis Modificado (g), modelo Logarítmico (h)

Figure 3. Kinetic modeling of *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) drying, Newton model (a), Two Terms Exponential model (b), Wang and Singh model (c), Approximate Diffusion model (d), Page model (e), Henderson and Pabis model (f), Modified Henderson and Pabis model (g), Logarithmic model (h).

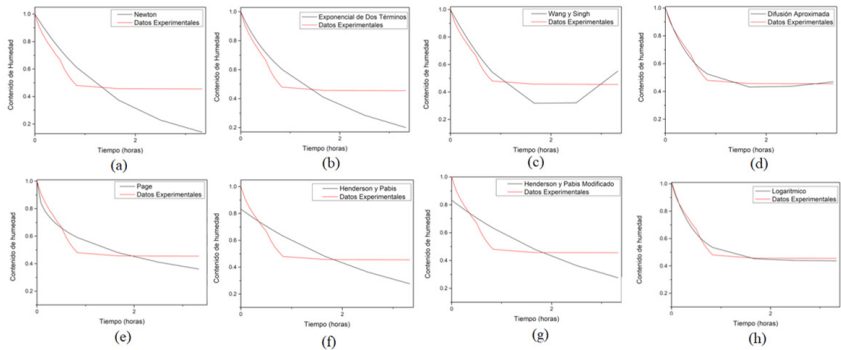


Figura 4. Modelado cinético del secado de *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae), modelo de Newton (a), modelo Exponencial de Dos Términos (b), modelo de Wang y Singh (c), modelo Difusión Aproximada (d), modelo de Page (e), modelo de Henderson y Pabis (f), modelo de Henderson y Pabis Modificado (g), modelo Logarítmico (h).

Figure 4. Kinetic modeling of *Zanthoxylum sprucei* (Rutaceae) drying, Newton model (a), Two Terms Exponential model (b), Wang and Singh model (c), Approximate Diffusion model (d), Page model (e), Henderson and Pabis model (f), Modified Henderson and Pabis model (g), Logarithmic model (h).

Cuadro 2. Modelos matemáticos de secado.

Table 2. Mathematical drying models.

<i>Especie</i>	<i>Modelos</i>	<i>Coefficientes ajustados</i>	R^2	E_{RMS}	X^2
<i>Melampodium divaricatum</i>	Newton	k: 0,327	0,9498	1,100x10 ⁻²	1,380x10 ⁻⁴
	Exponencial de dos términos	k:0,507 a: 0,415	0,9530	1,000x10 ⁻²	1,310x10 ⁻⁴
	Wang y Signh	a: -0,416 b: 0,186	0,9766	6,000x10 ⁻⁴	5,933x10 ⁻⁷
	Difusión Aproximada	a: 5,018 b: 1,000 k: 0,328	0,9498	1,100x10 ⁻²	1,700x10 ⁻⁴
	Page	k: 0,296 n: 0,806	0,9693	9,000x10 ⁻⁴	1,103x10 ⁻⁶
	Henderson y Pabis	a:0,986 k: 0,303	0,9590	8,510x10 ⁻⁵	8,852x10 ⁻⁹
	Henderson y Pabis Modificado	a: 0,328 k: 0,303 b: 0,328 g:0,303 c:0,328 h: 0,303	0,9590	8,510x10 ⁻⁵	1,593x10 ⁻⁸
	Logarítmico	w: 0,330 k:1,330 i: 0,670	0,9739	2,390x10 ⁻¹	7,860x10 ⁻²
<i>Zanthoxylum sprucei</i>	Newton	k: 0,590	0,435	6,900 x10 ⁻²	0,005
	Exponencial de dos términos	k: 2,532 a: 0,168	0,646	5,600 x10 ⁻²	0,003
	Wang y Signh	a: -0,684 b: 0,165	0,834	8,200 x10 ⁻²	0,007
	Difusión Aproximada	a: 0,677 b: -0,067 k:1,646	0,983	4,000 x10 ⁻³	2,494x10 ⁻⁵
	Page	k:0,575 n: 0,474	0,880	1,500x10 ⁻²	0,0002
	Henderson y Pabis	a: 0,832 k: 0,331	0,662	1,500x10 ⁻²	0,0002
	Henderson y Pabis Modificado	a: 0,277 k:0,331 b:0,277 g:0,331 c: 0,277 h: 0,331	0,662	1,500x10 ⁻²	0,0004
	Logarítmico	w:0,578 k: 2,132 i: 0,436	0,978	4,727x10 ⁻¹²	2,844x10 ⁻²³

La mayoría de los modelos empleados en las muestras de *Melampodium divaricatum* presentaron un R^2 inferior a 0,97 tan sólo 2 de los 8 modelos aplicados logran ajustarse a los datos experimentales, siendo estos el modelo Logarítmico y el modelo de Wang y Singh, siendo este último aquel que mejor ajuste presenta de acuerdo a los valores de X^2 y E_{RMS} , coincidiendo con los valores reportados por Salcedo, (2016).

En la modelación de *Zanthoxylum sprucei* sólo los modelos de Wang y Singh y el Logarítmico presentaron un buen ajuste a los datos experimentales del secado, siendo esta vez el modelo Logarítmico el que tuvo valores más bajos de X^2 y E_{RMS} , coincidiendo estos resultados con los obtenidos para el secado de hongos por Doymaz (2014) y secado de ñame por Montes *et al.*, (2008).

Coefficiente difusivo (D_f)

Los valores calculados del Coeficiente Difusivo (D_f) se encuentran en el cuadro 3. Pese a que en la literatura no existen valores reportados de D_f de las hojas estudiadas, éstas poseen valores similares a los encontrados por Özbek y Dadali, (2007) en hojas de menta y Akpinar, (2006) en hojas aromáticas los cuales van desde 10^{-10} hasta $10^{-12}.m^2.s^{-1}$.

Cuadro 3. Coeficiente Difusivo (D_f).

Table 3. Diffusive coefficient (D_f).

Muestra	D_f ($m^2.s^{-1}$)
<i>Melampodium divaricatum</i> (Asteraceae)	$5,636 \times 10^{-10}$
<i>Zanthoxylum de sprucei</i> (Rutaceae)	$6,712 \times 10^{-11}$

found by Özbek and Dadali, (2007), on the leaves of mint, and Akpinar (2006) on aromatic leaves which are from 10^{-10} to $10^{-12} m^2.s^{-1}$.

Conclusions

From the drying curves, the absence of induction periods, a small area of constant weight loss and a large decreasing area in both samples is evidenced. Likewise, it is established that the reduction in sample weights is directly proportional to the drying time of the samples. Diffusion is the mechanism that governs the migration of moisture in the samples of *Melampodium divaricatum* and *Zanthoxylum sprucei*. The logarithmic model is the one with the best adjustment in the samples of *Zanthoxylum sprucei*, while the Wang and Singh model, was the one with the best adjustment for the experimental data of *Melampodium divaricatum*.

End of English Version

Conclusiones

A partir de las curvas de secado se evidencia la ausencia de períodos de inducción, una pequeña zona de pérdida de peso constante y una gran zona decreciente en ambas muestras.

Asimismo, se establece que la reducción de pesos de las muestras es directamente proporcional al tiempo de secado de las muestras. La difusión es el mecanismo que gobierna la migración de humedad en las muestras de *Melampodium divaricatum* y *Zanthoxylum sprucei*. El modelo logarítmico es aquel que mejor ajuste presenta en las muestras de *Zanthoxylum sprucei*, mientras que el modelo de Wang y Singh, fue el que mejor ajuste presenta para los datos experimentales de *Melampodium divaricatum*.

Literatura citada

- Abano, E. E., H. Ma, and W. Qu. 2011. Influence of air temperature on the drying kinetics and quality of tomato slices. *J. Food Process Technol.* 2(5), 1-9.
- Adegbite, A. E., F. M. Ojo, O. G. Abraham, J. Francis and S. Balogun. 2019. First record of *Melampodium divaricatum* (Asteraceae) in West Tropical Africa. *Nordic Journal of Botany.* 37(4), 1-16.
- Agra, M. D. F., P. F. D. Freitas and J. M. Barbosa-Filho. 2007. Synopsis of the plants known as medicinal and poisonous in Northeast of Brazil. *Rev. Brasileira de Farmacognosia.* 17(1), 114-140.
- Akpınar, E. K. 2006. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. *J. of Food Engineering.* 77(4), 864-870.
- Ali, A., C. C. Oon, B. L. Chua, A. Figiel, C. H. Chong, A. Wojdylo and J. Lyczko. 2020. Volatile and polyphenol composition, anti-oxidant, anti-diabetic and anti-aging properties, and drying kinetics as affected by convective and hybrid vacuum microwave drying of *Rosmarinus officinalis* L. *Industrial Crops and Products.* 151, 1-13.
- Arslan, D. and M. M. Özcan. 2008. Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. *Energy Conversion and Management.* 49(5), 1258-1264.
- Bellagha, S., E. Amami, A. Farhat and N. Kechaou. 2002. Drying kinetics and characteristic drying curve of lightly salted sardine (*Sardinella aurita*). *Drying Technology.* 20(7), 1527-1538.
- Binutu, O. A. and G. A. Cordell. 2000. Constituents of *Zanthoxylum sprucei*. *Pharmaceutical Biology.* 38(3), 210-213.
- Can, A. 2000. Drying kinetics of pumpkinseeds. *Int. J. of Energy Research.* 24(11), 965-975.
- Castro, M. L. P., A. C. Villalobos y G. C. Gamboa. 2009. Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*). *Agronomía Mesoamericana.* 275-283.
- Coloma-Paxi, A., R. Paquita-Ninaraqui, R. Velásquez-Huallpa y R. L. Abarca. 2017. Efecto del escaldado y la temperatura en la cinética de secado de las hojas de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), variedad Salcedo INIA. *Agro Sur.* 45(3), 57-73.
- Costa, A. and H. Pereira. 2013. Drying kinetics of cork planks in a cork pile in the field. *Food and Bioproducts Processing.* 91, 14-22.
- Doymaz, I. 2012. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.). *Energy Conversion and Management.* 56, 199-205.
- Doymaz, I. 2014. Drying kinetics and rehydration characteristics of convective hot-air dried white button mushroom slices. *J. of Chem.* 1-8.
- Erbay, Z. and F. Icier. 2010. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 50(5), 441-464.
- Ertekin, C. and O. Yaldiz. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. of Food Engineering.* 63(3), 349-359.

- Fernandez, L., M. Ascanio, I. Botero, L. Cadenas, A. Matos y C. Sumoza. 2012. Etnobotánica: Una aproximación al conocimiento tradicional de las plantas medicinales. Memorias del Instituto de Biología Experimental. 6, 209-212.
- García, S. V., M. E. Schmalko y A. Tanzariello. 2007. Isothermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones. *RIA. Rev. de Investigaciones Agropecuarias*. 36(1), 115-129.
- Graham, J., S. Pendland, J. Prause, L. Danzinger, J. S. Vigo, F. Cabieses and N. Farnsworth. 2003. Antimycobacterial evaluation of Peruvian plants. *Phytomedicine*. 10(6-7), 528-535.
- Helen, C., V. Antonio, M. Y. Z. Bourgeois y D. Westhoff. 2003. Tecnología de alimentos. Editorial LIMUSA. Mexico. 768 p.
- Holowaty, S. A., A. E. Thea, C. Alegre and M. E. Schmalko. 2018. Differences in physicochemical properties of yerba maté (*Ilex paraguariensis*) obtained using traditional and alternative manufacturing methods. *J. of Food Process Engineering*. 41(8), 17-23.
- Ismail, O. and O. G. Kocabay. 2018. Drying kinetics of hot-air dried beef meat: application of mathematical models, energy consumption, and color characteristics. *Heat Transfer Research*. 49(14).
- Kaya, A. and O. Aydın. 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. *Energy Conversion and Management*. 50(1), 118-124.
- Kumar, C., A. Karim, S. C. Saha, M. U. H. Joardder, R. Brown and D. Biswas. 2012. Multiphysics Modelling of convective drying of food materials. Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference. 2012.
- Lorenzi, H. 2008. Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 4ta Edición. Instituto Plantarum de Estudos da Flora. Print Book. Nova Odessa SP (Brazil). 608 p.
- Montes, E. J. M., R. T. Gallo, R. D. A. Pizarro, O. A. P. Sierra y J. L. M. Escobar. 2008. Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 28, 9.
- Moreira, R. R. D., A. G. Santos, F. A. Carvalho, C. H. Perego, E. J. Crevelin, A. E. M. Crotti and C. V. Nakamura. 2019. Antileishmanial activity of *Melampodium divaricatum* and *Casearia sylvestris* essential oils on *Leishmania amazonensis*. *Revista do Instituto de Medicina Tropical de Sao Paulo*. 61, 1-7.
- Neto, J. R. F. y A. C. P. Chagas. 2001. A homocisteína como fator de risco coronariano. *Atherosclerosis*. 12(1), 20-25.
- Ocampo, A. 2016. Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista EIA*. 3(5), 119-128.
- Origin Lab(Pro). 2021. Versión 8.0. OriginLab Corporation. Northampton, MA, EE. UU.
- Özbek, B. and G. Dadali. 2007. Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *J. of Food Engineering*. 83(4), 541-549.
- Pelissari, G. P., R. C. L. R. Pietro y R. R. D. Moreira. 2010. Atividade antibacteriana do óleo essencial de *Melampodium divaricatum* (Rich.) DC., Asteraceae. *Revista Brasileira de Farmacognosia*. 20(1), 70-74.
- Pin, K. Y., T. Chuah, A. A. Rashih, C. Law, M. Rasadah and T. Choong. 2009. Drying of betel leaves (*Piper betle* L.): Quality and drying kinetics. *Drying Technology*. 27(1), 149-155.
- Rattanamechaiskul, C. and N. Junka. 2020. Modeling of fragment formation of parchment coffee beans for rapid heat and mass transfer during fluidization drying. *J. of Food Processing and Preservation*. 44(8), 1-9.
- Roberts, J. S., D. R. Kidd and O. Padilla-Zakour. 2008. Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*. 89(4), 460-465.

- Rocha, R. P., E. da Melo, J. B. de C. Corbín, P. A. Berbert, S. M. L. Donzeles y J. A. Tabar. 2012. Cinética del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 16(6), 675-683.
- Rondón M., S. Moncayo, X. Cornejo, J. Santos, D. Villalta, R. Siguencia and J. Duche. 2018. Preliminary phytochemical screening, total phenolic content and antibacterial activity of thirteen native species from Guayas Province Ecuador. *Journal of King Saud University – Science*. 30(4), 500-505.
- Rosa, D. P., D. Cantú-Lozano, G. Luna-Solano, T. C. Polachini and J. Telis-Romero. 2015. Mathematical modeling of orange seed drying kinetics. *Ciência e Agrotecnologia*. 39(3), 291-300.
- Salcedo, J. 2016. Modelado de la cinética de secado del afrecho de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 15(3), 883-891.
- Salibová, D. 2021. Ayahuasca ethno-tourism and its impact on the Indigenous Shuar Community (Ecuador) and Western Participants. *Cesky Lid*. 107(4), 511-532.
- Sandoval-Torres, S., J. Rodríguez-Ramírez, L. Méndez-Lagunas y J. Sánchez-Ramírez. 2006. Rapidez de secado reducida: Una aplicación al secado convectivo de plátano Roatán. *dokumen.tips*. 5(1), 35-38.
- SAS Institute, Inc. 2004. *SAS user's guide: Statistics*. 9th edition. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
- Sponchiado, G., M. L. Adam, C. D. Silva, B. S. Soley, C. de Mello-Sampayo, D. A. Cabrini and M. F. Otuki. 2016. Quantitative genotoxicity assays for analysis of medicinal plants: A systematic review. *J. of ethnopharmacology*. 178, 289-296.
- Tiwary, M., S. Naik, D. K. Tewary, P. Mittal and S. Yadav. 2007. Chemical composition and larvicidal activities of the essential oil of *Zanthoxylum armatum* DC (Rutaceae) against three mosquito vectors. *Journal of vector borne diseases*. 44(3), 198.
- Virgen-Navarro, L., E. J. Herrera-Lopez y H. Espinosa-Andrews. 2016. Estimación del coeficiente de difusividad durante el tostado de café en un lecho fuente utilizando un modelo difuso. 15(2), 13.
- Zhang, Q.-A., Y. Song, X. Wang, W. Q. Zhao and X. H. Fan. 2016. Mathematical modeling of debittered apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels during thin-layer drying. *J. of Food*. 14(4), 509-517.