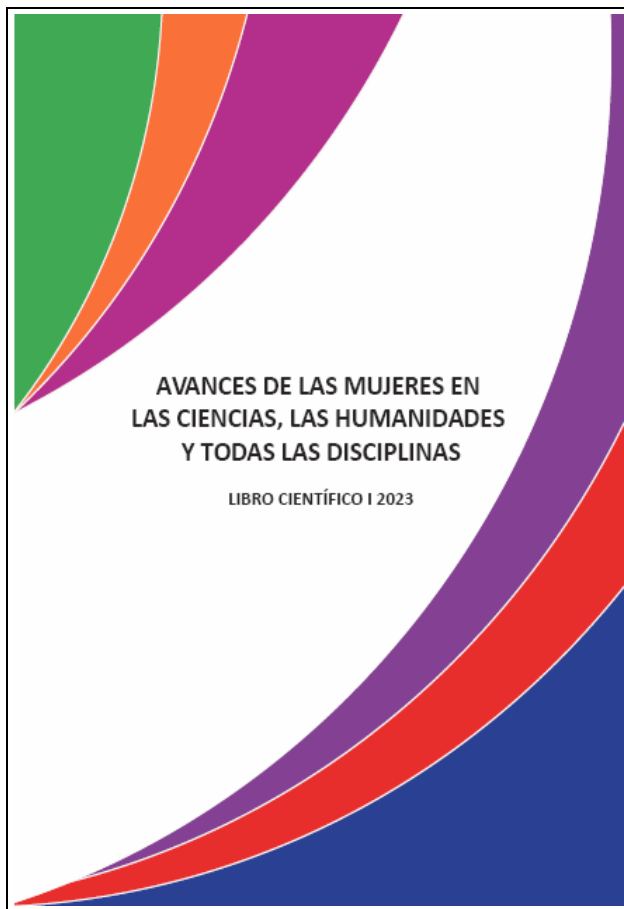


DOI: <https://doi.org/10.24275/uama.128.10417>



Mabel Vaca Mier

ORCID: [0000-0002-1341-7863](https://orcid.org/0000-0002-1341-7863)

Raymundo López Callejas

ORCID: [0000-0001-9415-3435](https://orcid.org/0000-0001-9415-3435)

Arturo Lizardi Ramos

ORCID: [0000-0002-6879-3057](https://orcid.org/0000-0002-6879-3057)

Análisis de la cinética de secado del sargazo en un secador solar del tipo indirecto

Páginas: 97-109

En:

Avances de las mujeres en las ciencias, las humanidades y todas las disciplinas. Libro científico I, 2023. / Leticia González Zamora ... [et al.]; editora, compiladora y directora del equipo editorial, Yadira Alatríste Martínez. 1ª ed. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, 2023-11-27.

(Ciencias Básicas e Ingeniería)

ISBN Libro digital: 978-607-28-3053-0

Obra completa: <https://doi.org/10.24275/uama.379.10407>

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco



División de
Ciencias Básicas e Ingeniería



Ciencias y Artes para el Diseño

División de
Ciencias y Artes para el Diseño



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como
Atribución-NoComercial-SinDerivadas

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL SARGAZO EN UN SECADOR SOLAR DEL TIPO INDIRECTO

Mabel Vaca Mier¹, Raymundo López Callejas²,
Arturo Lizardi Ramos³.

Departamento de Energía, UAM- Azcapotzalco^{1,2,3}

mvm@azc.uam.mx¹, rlc@azc.uam.mx², arlr@azc.uam.mx³

Resumen

En los últimos 15 años en las regiones del Caribe, el Golfo de México y la Florida, entre otras, se ha presentado una desmedida cantidad de algas denominadas sargazo, las cuales han afectado tanto al ambiente como a la actividad económica de estas regiones. Anualmente, casi un millón de toneladas de sargazo llega al Golfo de México provenientes del Mar del Sargazo en el Océano Atlántico. Estas algas marinas tienen diversos usos, son fuente de aminoácidos, vitaminas, proteínas y otros polisacáridos, se emplean como mejoradores de suelo, por su contenido de nutrientes, se transforman en biocombustibles, o como alimento para el ganado. Una alternativa de uso del sargazo de interés es su aplicación después del secado, proceso que ayuda a su conservación y manejo, como fuente de energía térmica o como soporte de composteo para el tratamiento de suelos contaminados.

En este trabajo se presenta el análisis de la cinética del secado del sargazo en un secador solar del tipo indirecto. Se emplearon cuatro modelos: Newton, Page, Henderson y Pabis; y Midilli et al., (descritos en López-Callejas et al., 2009). El sargazo empleado fue traído directamente de las playas de Cancún, Q. R., en estado congelado para su conservación y análisis. Para lograr su secado con este método se requirieron 10 horas en total, distribuidas en dos periodos no consecutivos, obteniéndose, en función del tiempo, los valores de radiación solar, temperaturas y variación de masa. El modelo cinético que mejor simuló el proceso de secado fue el de Anderson y Pabis, pues en el análisis estadístico realizado se obtuvo el mayor valor de R^2 (0.9973), y el menor valor de X^2 (0.00042), también se determinó la energía de activación E_a (35.8 kJ/mol).

Palabras clave: Sargazo, secado, energía solar, cinética del secado.

Abstract

There has been an excessive production of algae called sargasso in the past 15 years in the Caribbean, Gulf of Mexico and Florida, among other coast areas, which has affected both the environment and the economic activity of these regions. Annually, nearly one million tons of sargasso arrive in the Gulf of Mexico from the Sargasso Sea in the Atlantic Ocean. These seaweeds have various uses, they are source of amino acids, vitamins, proteins and other polysaccharides, they are used as soil amendments because of their nutrient content, they are transformed into biofuels, or serve as food for livestock. An alternative use of sargasso of interest is its application after drying, a process that helps its conservation and management, as a source of thermal energy or as compost support for the treatment of contaminated soils.

This paper presents the analysis of the kinetics of sargasso drying in a solar dryer of the indirect type. For this purpose, four models were used: Newton, Page, Henderson and Pabis; and Midilli et al., (described in López-Callejas et al., 2009). The sargasso used was brought directly from the beaches of Cancun, Q. R., in a frozen state for conservation and analysis. To achieve its drying with this method, a total of 10 hours were required, in two non-consecutive periods; solar radiation values, temperatures and mass variation were obtained, as a function of time. The kinetic model that best simulated the drying process was that of Anderson and Pabis, after the statistical analysis performed, with the highest value of R^2 (0.9973), and the lowest value of X^2 (0.00042). We also obtained the activation energy E_a (35.8 kJ/mol)

Key words: Sargasso, drying, solar energy, kinetics drying.

Introducción

En los últimos 15 años en las regiones del Caribe, el Golfo de México y la Florida, entre otras, se ha presentado una desmedida cantidad de algas denominadas sargazo, lo cual afectado tanto al ambiente como a la actividad económica de estas regiones. Anualmente, casi un millón de toneladas de sargazo llega al Golfo de México provenientes del Mar del Sargazo en el Océano Atlántico (Smetacek y Zingone, 2013). Sin embargo, estas algas marinas tienen diversos usos potenciales, son fuente de aminoácidos, vitaminas, proteínas y otros polisacáridos, se emplean como mejoradores de suelo, por su contenido de nutrientes, se transforman en biocombustibles, o como alimento para el ganado (Laffoley et al., 2011).

Existen más de 350 especies del género *Sargassum*, la mayoría tiene una fase madura que crece anclada al fondo del mar por una estructura similar a una raíz. Sobresalen por su abundancia dos especies, *S. natans* y *S. fluitans*, la diferencia entre ellas es la estructura de sus hojas las cuales son más finas en la primera especie y más grandes y fuertes para la segunda, ambas son holopelágicas (Laffoley et al., 2011). En los últimos años, las algas provenientes del mar han conformado un mercado mundial de aproximadamente 6 000 millones de dólares al año, de los cuales el 85 % es de productos alimenticios y el 15 % restante es de productos para la industria farmacéutica. El principal comercio de estas algas es en los países asiáticos; para los países europeos y americanos han sido fuente de productos de la industria farmacéutica únicamente (Xianglu et al., 2021). Recientemente se han realizado propuestas y estudios para utilizar el sargazo como fuente de energía principalmente como biocombustible (López-Sosa et al., 2020) y como material para pavimentos, (Salazar-Cruz et al., 2020). A pesar de todos los beneficios potenciales del sargazo, uno de los principales retos para su uso es su manejo, ya que después de su recolección, durante su almacenamiento se presentan fenómenos de descomposición y proliferación de organismos nocivos.

Se estima que las pérdidas económicas por el turismo para el Caribe y el golfo de México son de aproximadamente 29 200 millones de dólares, ya que los turistas no llegan a estas playas, también se ha estimado que para evitar que el sargazo llegue a ellas se requiere una inversión de 120 millones de dólares (Milledge y Harvey, 2016). Una alternativa para paliar esta problemática se enfoca en el uso del sargazo en aplicaciones después del secado, proceso que ayuda a su conservación y manejo, para poder emplearse como fuente de energía térmica o como soporte de composteo para el tratamiento de suelos contaminados, entre otros usos. Se consideró de forma primordial utilizar una fuente alternativa (energía limpia) para llevar a cabo el secado de manera económica y eficaz.

Este trabajo presenta la cinética del secado del sargazo, empleando un calentador solar del tipo indirecto, el cual ofrece la ventaja de que la cámara de secado está separada; de esta forma, la radiación solar no toca al producto y se pueden conservar mejor algunas propiedades, como sus propiedades farmacéuticas, alimenticias o su poder calorífico.

Metodología

Modelado matemático

Para describir el comportamiento del modelo del proceso de secado de diferentes productos vegetales, como el sargazo, se requiere del análisis empleando métodos estadísticos de regresión y correlación. Los modelos de regresión lineal y no-lineal son herramientas importantes que permiten encontrar la relación entre las diferentes variables, especialmente para aquellas en las que no se ha establecido relación empírica alguna. En este trabajo, se determinó el mejor modelo que describe el proceso de secado del sargazo con aire por la técnica de regresión múltiple de Arrhenius (Akpinar et al., 2003). Para este análisis de regresión se utiliza el software Origin.

La relación de humedad se calcula como:

$$R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

La cual se ha simplificado a:

$$R = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

donde M_t es la masa en el tiempo t , M_e es la masa de equilibrio y M_0 es la masa inicial.

Existen varias ecuaciones que se emplean en el modelado matemático de una capa delgada de material, en la tabla 1 se enlistan los modelos que se emplearon en esta investigación. Se han seleccionado los que mejor describen la curva de secado del sargazo (López et al., 2009), con los siguientes criterios empleados para encontrar el mejor modelo: el coeficiente de correlación (R^2) cercano a la unidad, el menor valor posible de la chi-cuadrada (X^2) y el error de la raíz cuadrada media (RMSE) que proporciona la desviación estándar entre los valores experimental y predicho, se requiere que sea lo más cercano a cero. Sus expresiones son:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i}) \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})^2]}} \quad (3)$$

$$(4) \quad \chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N-n} \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{exp},i})^2}{N}} \quad (5)$$

donde $MR_{\text{exp},i}$ es el valor de la relación de humedad medido experimentalmente, $MR_{\text{pre},i}$ es el valor de la relación de humedad predicho, para esta medición existe n valores, ya que depende del número de observaciones y del número de constantes respectivamente (Yaldiz, et al., 2001).

Tabla 1. Modelos de la cinética de secado.

Modelo	Ecuación
Page (1949)	$MR = \exp(-kt^n)$
Newton (Jayas et al., 1999)	$MR = \exp(-kt)$
Henderson y Pabis (1961)	$MR = a * \exp(-kt)$
Midilli et al. (2002)	$MR = a * \exp(-kt^n) + bt$

Coefficiente de difusión

En el proceso de secado la difusividad es el único mecanismo físico para la transferencia de la humedad a la superficie y se define por la segunda ley de difusión de Fick, para una capa delgada de producto, como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial M}{\partial x^2} \quad (6)$$

Las condiciones iniciales son:

- Se considera que la distribución de la masa es uniforme en todo el material.
- La transferencia de la masa es simétrica con respecto al centro.
- El contenido de humedad en la superficie está en equilibrio con el medio que la rodea.
- El coeficiente de difusión es constante.
- El encogimiento del material es despreciable.

Por lo tanto, las condiciones de frontera son:

$$t = 0, -L < x < L, M = M_0 \quad (7)$$

$$t > 0, x = L, M = M_e \quad (8)$$

$$t > 0, x = -L, M = M_e \quad (9)$$

Entonces, la solución de la ecuación (6), de acuerdo con Kaymak-Ertekin (2002) y Akpınar et al. (2003), es:

$$MR = \frac{M_i}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff}\pi^2}{4L^2} t\right) \quad (10)$$

La difusividad efectiva de la humedad se determina con la gráfica de los datos experimentales del $\ln(MR)$ vs tiempo

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{D_{eff}\pi^2}{4L^2} t\right) \quad (11)$$

La pendiente de la recta anterior es el valor de la difusividad efectiva a diferentes temperaturas:

$$pendiente = -D_{eff} \left(\frac{\pi^2}{4L^2}\right) \quad (12)$$

La difusividad efectiva varía con la temperatura de acuerdo con la dependencia de Arrhenius, como:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (13)$$

en la cual D_0 es la difusividad a la temperatura infinita, E_a , es la energía de activación para la difusión de la humedad, T , es la temperatura y R , es constante del gas. En este caso la ecuación es:

$$\ln D_{eff} = \ln(D_0) + \left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (14)$$

Prototipo utilizado

El secador solar utilizado en este trabajo se muestra en la Figura 1. Es del tipo indirecto y opera en condiciones de convección natural. El captador tiene una superficie de aproximadamente 0.8 m^2 . Está cubierto por un cristal de 0.005 m de espesor. Tiene una inclinación de 40° con respecto a la horizontal con orientación sur-norte para captar el máximo de la radiación solar. Las dimensiones de la cámara de secado son $0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m} \times 1.00 \text{ m}$ de altura, posee tres charolas en las cuales se coloca el producto a secar, las dimensiones son de $0.40 \text{ m} \times 0.40 \text{ m}$ y están separadas por una distancia de 0.15 m entre ellas.

La temperatura del aire y del producto a secar en la cámara de aire se determinó con tres termopares tipo K debidamente calibrados, que tienen una exactitud de $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. El primer termopar registra la temperatura del aire a la entrada de la cámara, el segundo está dentro de una de las muestras a secar

y el tercero está a la salida de la misma cámara. La humedad relativa del aire del medio ambiente se midió con un higo-termómetro digital EXTECH modelo EA25, con una exactitud de medición de $\pm 0.1\%$. Fue ubicado en el exterior del colector solar. La medición de la masa del producto se realizó con una balanza digital SARTORIUS modelo BL1505, con una exactitud de medición de ± 0.01 g, ubicada fuera de la cámara de secado. Para la medición de la radiación solar se usó un piranómetro EPPLEY modelo 8-48, con una exactitud de medición de ± 1 W/m², localizado sobre la cubierta de cristal del colector solar. Todas las variables se registraron utilizando el software Lab-View debidamente programado en intervalos de 10 minutos.

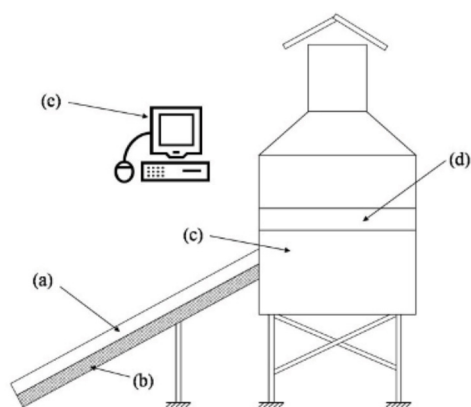


Figura 1. Diagrama del colector solar, a) área de captura; b) medio poroso; c) cámara de secado; d) tres charolas para el producto a secar; e) sistema de adquisición de datos.

Procedimiento experimental

El sargazo se recolectó en el mar antes de que arribara a la playa de Cancún, Quintana Roo, se lavó perfectamente bien y se escurrió para proceder a su empaclado. Se separaron muestras de 100 g (masa húmeda), las cuales fueron congeladas hasta una temperatura de -12 °C, para su traslado a la Ciudad de México, el mismo día. En cuanto arribó a las instalaciones del laboratorio se le colocó nuevamente en el congelador a -12 °C para su conservación. Para el proceso de secado, se tomó una de las muestras y se le colocó al medio ambiente para su descongelamiento, se le sacudió perfectamente para retirarle el agua y se procedió a medir su masa inicial. Se colocó la muestra de 0.100 kg en la charola intermedia y se procedió a iniciar el proceso de secado, cuidando que los termopares estuvieran en su lugar.

Se inició el proceso de evaluación con la ayuda del software Lab-View, el cual registró las temperaturas del medio ambiente, del aire a la entrada y salida de la cámara de secado y uno más para la temperatura del producto, además de la radiación solar; el registro se hizo cada diez minutos. Se realizaron ocho pruebas experimentales.

Resultados obtenidos y discusión

La evaluación del secado se realizó durante los meses de julio y agosto de 2019, la radiación solar que incidió sobre el calentador solar se muestra en la Figura 2. El valor máximo fue de 980.00 W/m² en promedio considerando ambos meses, y ocurrió alrededor de las 14:00 horas del día, la ecuación obtenida para esta radiación en función del tiempo es:

$$I = 209.68 + 236.63 t + 15.07 t^2 - 8.14 t^3 + 0.39 t^4 \quad (15)$$

ya la cantidad de energía total que se recibió fue de 6.415 kW/m² h en promedio para ambos meses.

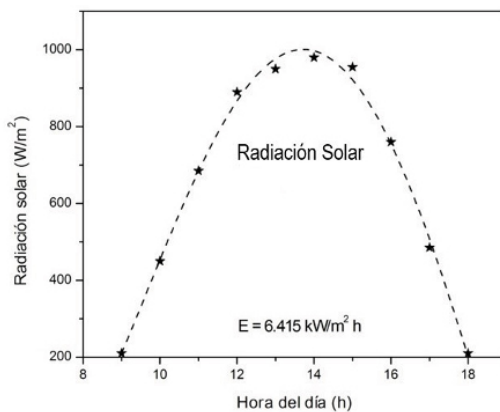


Figura 2. Radiación solar incidente sobre el colector.

Las temperaturas máximas del aire en la cámara de secado fueron de 63.0 °C a la entrada, a la salida de 58.6 °C y en el sargazo de 61.4 °C, se presentaron cuando la radiación solar también tuvo su valor máximo, es decir, a las 14:00 horas. En la Figura 3 se presentan los valores registrados.

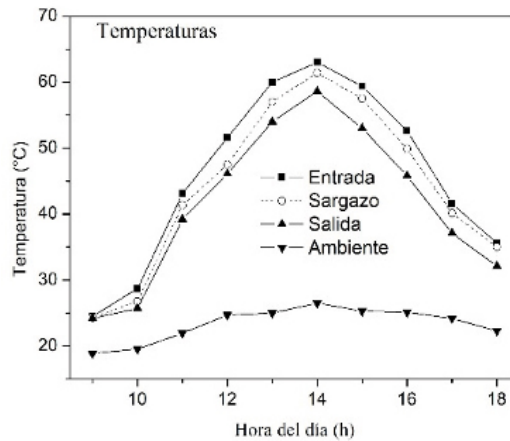


Figura 3. Distribución de temperaturas en la cámara de secado.

La masa promedio al inicio de las muestras de sargazo fue de 0.100 kg y después de 10 horas en la cámara de secado la masa final fue de 0.0016 kg, la cual es aproximadamente el 15 % del original. La experimentación se continuó por 2 horas más del día siguiente, pero el contenido de humedad ya no presentó cambio alguno, por esta razón se seleccionó como tiempo de secado el mencionado anteriormente. Con estos valores se calculó la relación de humedad contenida en las muestras del sargazo. En la Figura 4 se presenta la curva de la relación de humedad durante la experimentación de las muestras del sargazo, en esta gráfica se considera el promedio de las ocho evaluaciones realizadas.

Estos valores se aplican a los modelos numéricos mencionados anteriormente. Buscando determinar el que mejor describiera la evolución del proceso de secado, se aplicaron las condiciones previamente descritas: usando como criterio a R^2 cercano a la unidad y X^2 lo más cercana a cero. El modelo cinético que mejor describe el proceso de secado del sargazo, aplicando los procesos experimentales descritos, es el de Anderson y Pabis, pues en el análisis estadístico realizado se obtuvo el mayor valor de R^2 (0.979), y el menor valor de X^2 (0.00042). En la Figura 5 se muestran ambas gráficas. En la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos para los cuatro modelos utilizados.

La ecuación de la relación de humedad de Henderson y Pabis (1961) es:

$$MR = 107.612 \exp(-0.00552t) \quad (16)$$

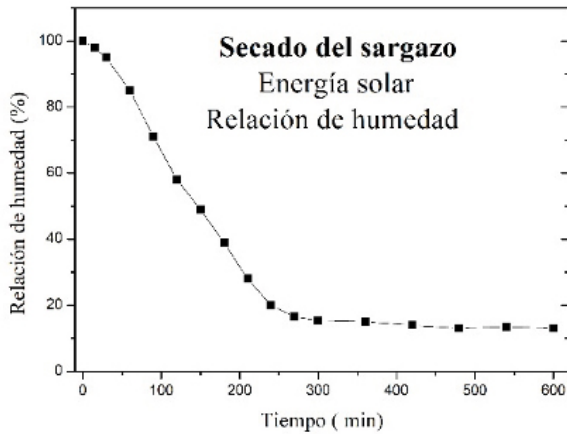


Figura 4. Relación de humedad del proceso de secado del sargazo.

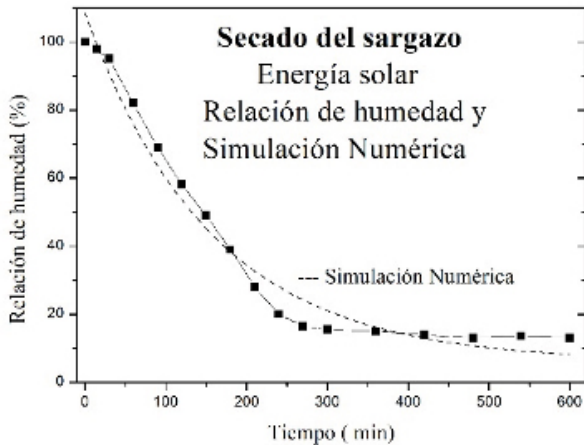


Figura 5. Gráfica del modelo de Henderson y Pabis.

Tabla 2. Valores del análisis estadístico.

Modelo	R^2	χ^2
Page (1949)	0.958	0.0007
Newton (Jayas et al, 1991)	0.962	0.00053
Henderson y Pabis (1961)	0.979	0.00042
Midilli <i>et al.</i> (2002)	0.971	0.00048

La energía de activación del agua se determinó con el método de la ecuación de Arrhenius, descrita con la ecuación (14), por lo tanto, fue necesario realizar la gráfica del $\ln(RM)$ contra el tiempo y la pendiente de ésta correspondió a su valor. En la Figura 6 se presenta la gráfica correspondiente, de la cual se obtiene un valor de $E_a=35.8$ kJ/mol para la energía de activación.

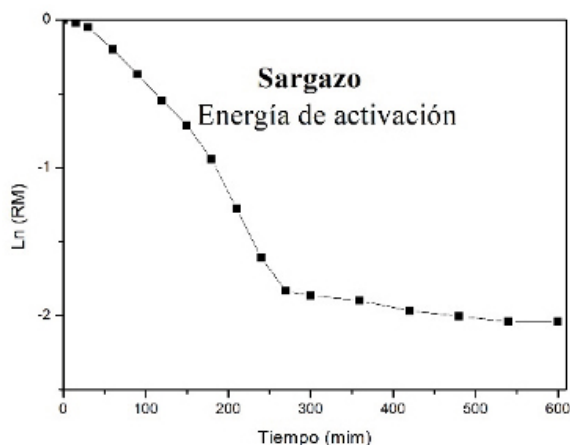


Figura 6. Gráfica de la Energía de Activación del agua.

Conclusiones

El problema del alga denominada sargazo se ha incrementado últimamente causando graves daños a la economía de las poblaciones del Caribe, para el caso particular de México, el estado con mayores afectaciones es Quintana Roo. Una vez que el sargazo ha llegado a las playas se acumula sobre la arena causando graves molestias al turismo, principalmente, lo que repercute seriamente en la economía de las poblaciones costeras.

Con la finalidad de proponer una alternativa al manejo del sargazo para su posterior aprovechamiento, se procedió a determinar la cinética de un proceso ambientalmente sostenible de secado, así se podría utilizar de varias formas, entre ellas para el tratamiento de suelos contaminados, en aplicaciones farmacéuticas o bien como fuente de energía térmica, entre otras. El método seleccionado emplea energía solar, mediante un secador solar del tipo indirecto, cuya cámara está separada; de esta manera la radiación solar no toca al producto.

Los resultados obtenidos muestran que las muestras de aproximadamente 0.10 kg se deshidratan hasta un 15% de la humedad inicial en aproximadamente

10 horas. La evaluación se realizó en dos días consecutivos, después de este tiempo se continuó con el experimento, pero el producto mantuvo constante su contenido final de humedad. El modelo numérico de predicción del proceso de secado que mejores resultados proporcionó fue el Anderson y Pavis. Los criterios empleados para su determinación fueron el coeficiente de correlación (R^2) cercano a la unidad, el menor valor posible de la chi-cuadrada (X^2) y el error de la raíz cuadrada media (RMSE) que proporciona la desviación estándar entre los valores experimental y predicho, con un valor lo más cercano a cero. La ecuación del proceso es: $MR=107.612 \exp(-0.00552t)$.

Para determinar la energía de activación del agua se utilizó el método de la ecuación de Arrhenius, cuyo valor fue de $E_a=35.8$ kJ/mol.

Con los valores obtenidos es posible diseñar un sistema novedoso de secado, que emplea energía limpia y que permite el aprovechamiento del sargazo, conservando sus características de interés para distintas aplicaciones sin los inconvenientes de salubridad y descomposición que implica el manejo y almacenamiento de este material fresco o húmedo.

Referencias

- [1] Akpınar, E., Bicer Y., Yildiz C. (2003). Thin layer drying of red pepper, *Journal of Food Engineering*, Vol. 59.
- [2] Henderson, S., Pabis, S. (1961). Grain drying theory: I. Temperature effects on drying coefficient *Journal of Agricultural Engineering Research*. Vol. 6.
- [3] Ayras, D., Cenkowski, S., Pabis, S., Muir, W. (1991). Review of thin layer drying and wetting equations. *Drying Technology*. Vol. 9.
- [4] Kaymak-Ertekin, F. (2002). Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers, *Journal of Food Science*, Vol. 67.
- [5] Laffoley, D. d'A., Roe, H. S. J., Angel, M. V., Ardron, J., Bates, N. R., Boyd, L. L., Brooke, S., Buck, K. N., Carlson, C. A., Causey, B. (2011). *The Protection and Management of the Sargasso Sea: The Golden*
- [6] *Floating Rainforest of the Atlantic Ocean: Summary Science and Supporting Evidence Case; Sargasso Sea Alliance: St. George's, Bermuda.*
- [7] López, R., de Ita, A., Vaca, M. (2009). Drying of prickly pear cactus cladodes (*Opuntia ficus indica*) in a forced convection tunnel. *Energy Conversion and Management*, Vol. 50. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.014> López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., RodríguezMartínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J. Alcaraz-Vera, J. V., Rutiaga-Quiñones, J. G., Zárate-Medina, J., Ávalos-Rodríguez, M. L., Morales, M. (2020) *Applied Science*, Vol. 10. doi:10.3390/app10238706
- [8] Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. (2002), A new model for single layer drying. *Drying Technology*, 20.

- [9]Milledge J., Harvey P., (2016). Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The Valorisation of Sargassum from Beach Inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 4. doi:10.3390/jmse4030060.
- [10]Page G. (1949). Factor influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer. Master Thesis, Purdue University.
- [11]Salazar-Cruz, B. A., Zapien-Castillo, S., Hernández-Zamora, G., Rivera-Armenta, J. L. (2021). Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. *Construction and Building Materials*. Vol. 217. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121876.
- [12]Smetacek, V., Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, Vol. 504. doi:10.1038/nature12860.
- [13]Xianglu Z, Zhihang Z, Laura M., Da-Wen, Brijesh K. (2021). *Ultrasonics – Sonochemistry*. Vol. 70. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105298.
- [14]Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultanagrapes. *Energy*. Vol. 26.