

Estudio de la cinética de secado del maíz suave (*Zea mays* L) variedad Guagal (INIAP 111)

Study of the drying kinetics of soft corn (*Zea mays* L) Guagal variety (INIAP 111)

Roxana García-Culqui¹ ; Lady Guevara-Narváez¹ ; Franz Verdezoto-Mendoza¹ ; Juan Gaibor-Chávez¹ *

¹Carrera de Agroindustrias, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente, Dirección de Investigación y Vinculación, Universidad Estatal de Bolívar – Provincia Bolívar – Ecuador, CP:020150.

*Corresponding author. jgaibor@ueb.edu.ec

Available from: <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2023.08.04.5>

RESUMEN

El objetivo fue determinar la cinética de secado del maíz (*Zea mays* L), variedad Guagal mejorado. Se realizaron con tres muestras de materia prima a temperaturas no controladas entre 60 °C – 80 °C durante 12 horas, seguido por el proceso de cinética de secado en una estufa a 104°C durante 24 horas. Las muestras iniciaron con pesos de 8.09 g; 10.02 g; 11.16 g respectivamente con una humedad inicial de 22.13 % y se obtuvo una humedad final de 0,53 %; 0,7 %; 0,61 %. Las variables medidas incluyeron la humedad en base seca, total y en equilibrio, el flujo de calor, la cantidad y la eficiencia de calor, y la velocidad de secado. Se determinó que la velocidad de secado a mayores temperaturas favorece a la transferencia de masa y energía. Se estableció que el modelo de Henderson y Pabis fue el que mejor se adaptó a los datos experimentales obtenidos en el proceso de cinética de secado a 104°C por 24 horas $R^2 = 99,798\%$; mientras que el modelo de Page fue el que mejor se adaptó a los datos obtenidos durante la deshidratación a 60-80°C durante 12 horas $R^2 = 99,881 \%$. Esto sugiere que se pueden obtener mejores resultados de secado y deshidratación con la variedad de maíz INIAP 111 Guagal mejorado si se considera el establecimiento de la temperatura adecuada y el tiempo de procesamiento.

Palabras clave: Cinética, secado, maíz, modelo matemático, harina de maíz.

ABSTRACT

The objective was to determine the drying kinetics of corn (*Zea mays* L), variety INIAP 111 Guagal improved, for the production of corn flour. The experiments were conducted with three raw material samples at uncontrolled temperatures between 60 °C - 80 °C for 12 hours, followed by the drying kinetics process in an oven at 104°C for 24 hours. The samples started with weights of 8.09 g, 10.02 g, and 11.16 g, respectively, with an initial moisture content of 22.13 % and a final moisture content of 0.53 %; 0.7 %; 0.61 % was obtained. Variables measured included moisture on dry, total and equilibrium basis, heat flux, heat quantity and efficiency, and drying rate. It was determined that the drying rate at higher temperatures favors mass and energy transfer. It was established that the Henderson and Pabis model was the best fit to the experimental data obtained in the drying kinetics process at 104°C for 24 hours $R^2 = 99.798\%$, while the Page model was the best fit to the data obtained during dehydration at 60-80°C for 12 hours $R^2 = 99.881 \%$. This suggests better drying and dehydration results can be obtained with the improved INIAP 111 Guagal maize variety if proper temperature setting and processing time are considered.

Keywords: Kinetics, drying, corn, mathematical model, fit, Henderson-Pabis, Page

INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cereales más importantes en la alimentación humana, por sus diferentes usos y su valoración sociocultural. Presenta fuentes de aminoácidos y energía por su contenido de proteínas, aceite

y almidón. Contiene minerales como K, Fe, Zn, Ca, P, Si, Cu y Mg y vitaminas del tipo B, A y C, B4, B6, C, E, B2, B3, B1, B9 y A^{1,2}.

El cultivo de maíz suele en el Ecuador es de vital importancia por sus distintas variedades existentes, según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en el año 2020 se sembró aproximadamente una superficie de cosecha 74018 ha pertenecientes a la Región Sierra, representando un 80% a nivel nacional con una tasa de consumo per-cápita del 14,5 kg/año². El maíz harinoso se cultiva en tierras altas de 4000 m sobre el nivel del mar; en las principales provincias de Tungurahua, Bolívar y Chimborazo se cultivan variedades de maíz blanco harinoso, especie Guagal (*Zea mays*, L), este cultivo es sembrado mayormente en la provincia de Bolívar^{3,2}. Siendo representado un 30% a nivel nacional, los principales cantones en producir este cereal San Miguel y Guaranda⁴.

El proceso de secado desempeña un papel crucial en la agroindustria al preservar los granos, ya que busca reducir al máximo la presencia de agua, lo que a su vez limita el crecimiento de microorganismos dañinos que pueden afectar negativamente el desarrollo del producto⁵. De igual manera, durante el proceso de secado del maíz, se produce la evaporación de aproximadamente un tercio a un cuarto de la masa del grano seco antes de que llegue al área de almacenamiento. En esta fase, el grano es expuesto a una corriente de aire caliente, lo que eleva su temperatura hasta el punto de ebullición del agua. En primer lugar, se elimina el agua libre, seguida por la eliminación del agua contenida en los capilares, hasta alcanzar un nivel conocido como el umbral de estabilización, que se logra cuando la humedad llega al 13%⁶.

La cinética de secado detalla la transferencia de masa y calor en el proceso de secado, revelando la conexión entre las variables del proceso y el tiempo necesario para el secado completo⁷. Las curvas de secado se representan como la relación entre el contenido de humedad y el tiempo en condiciones húmedas o secas, la velocidad de secado en función del tiempo, o la velocidad de secado en relación al contenido de humedad⁸. Para el secado de granos se describe usando modelos matemáticos tales como Newton, Page, Henderson y Pabis que permiten predecir la cinética del proceso⁷.

El objetivo fue estudiar la cinética de secado del maíz suave (*Zea mays* L) variedad Guagal (INIAP-111)

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales ocupados para la presente investigación fueron: maíz (*Zea mays*. L) Guagal INIAP-111; para la realización de la cinética de secado fue necesario una estufa Memmert con bandejas de aluminio de 10 cm de radio. La deshidratación se realizó en un secador de bandejas tipo vertical de dimensiones 61cm×78,5 cm×3,06 cm, donde el sistema de calentamiento funciona por aire apoyado de un ventilador eléctrico con resistencias de 110 V y 4 A.

El maíz se recolectó de forma manual en la parroquia Santa Fé, Guaranda – Ecuador Para la deshidratación del maíz se ocupó un secador por bandejas.

Cinética de secado

En la determinación de la cinética de secado del maíz (*Zea mays* L) INIAP 111 Guagal, se utilizó una estufa Memmert a 104°C, donde el grano se desprendió de la coronta y fue colocado en bandejas de aluminio de 10 cm de radio. Se ocupó tres muestras, de peso inicial 8,09 g; 10,02 g; 11,16 g respectivamente, con una humedad inicial de 22,13%; las muestras se introdujeron en la estufa durante 24 hr, controlando el peso cada hora. Para la construcción de las curvas de secado se graficó la relación de humedad (MR) con base al tiempo⁹. Para determinar el modelo matemático en la cinética de secado se utilizaron los siguientes modelos Newton-Lewis, Page, Henderson y Pabis.

Modelos matemáticos para cinética de secado

La curva de secado obtenida experimentalmente se representa mediante los modelos (1), (2), (3), citados en¹⁰, donde a y n son parámetros constantes característicos de la materia prima, k es un parámetro empírico del comportamiento cinético en (min^{-1}), t es tiempo (min) y MR relación de humedad (adimensional), que relaciona el gradiente de la humedad de la muestra a tiempo real con la humedad inicial y la humedad de equilibrio.

Modelo de Newton Lewis

$$MR = e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

Modelo de Page

$$MR = e^{-k \cdot t^n} \quad (2)$$

Modelo de Henderson y Pabis

$$MR = a \cdot e^{-k \cdot t} \quad (3)$$

Para determinar el contenido de humedad en base seca (ω), se utilizará la fórmula (4) descrita a continuación, para las tres muestras de maíz (*Zea mays L*) INIAP 111 Guagal mejorado, en relación a masa de agua (m_{H_2O}) y masa seca (m_d) de la materia, además el peso seco ($m_{materia\ seca}$) mediante las ecuaciones (5).

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_d} \quad (4)$$

$$m_{materia\ seca} = m_{materia\ húmeda} \left(1 - \frac{\omega}{100}\right) \quad (5)$$

La razón de humedad (MR) durante el secado fue calculada mediante la ecuación (6)⁷, la cual sirve para realizar la cinética de secado donde ω_t es contenido de humedad en cualquier momento y ω_0 es humedad inicial.

$$MR = \frac{\omega_t - \omega_e}{\omega_0 - \omega_e} \quad (6)$$

Se calculó la humedad en equilibrio (ω_e) mediante la ecuación (7)¹¹, que relaciona el peso de la masa cuando alcanza el punto de equilibrio (m_e) con base al peso de la masa seca (ms).

$$\omega_e = \frac{m_e - ms}{m_e} * 100 \quad (7)$$

La eficiencia del secador se determina de la siguiente manera:

$$n = \frac{(Mh - Ms) * hfg}{\frac{Q_u}{Ab} * Ac} \quad (8)$$

n : Eficiencia del secador (%); Mh : Masa de gramínea con humedad (kg); Ms : Masa total de gramínea seca (kg); hfg : Calor de vaporización del agua ($\frac{KJ}{kg}$); Q_u : Calor útil. (kg); L_{camara} :¹²

Para determinar el flujo de calor promedio (\dot{q}_{prom}) se ocupa la ecuación (9) donde relaciona el índice de transferencia de calor promedio (\dot{Q}_{prom}) con el área (A)

$$\dot{q}_{prom} = \frac{\dot{Q}_{prom}}{A} \quad (9)$$

Deshidratación

El secador utilizado fue de escala de laboratorio, de geometría rectangular que simula condiciones normales, pues, la cámara de secado no tiene un control de temperatura. Las bandejas tienen longitudes de 61cm×78,5 cm×3,06 cm. El sistema de calentamiento funciona por aire apoyado de un ventilador eléctrico con resistencias de 110 V y 4 A. Para obtener las lecturas de temperatura dentro del secador se utilizó un termómetro, el proceso de secado duró hasta que la muestra inicial de 504.0 g llegó a un peso constante, tomando en cuenta que existió una variación de temperatura entre 60 a 80 °C.

Para el procesamiento de harina se ocupó el secador mencionado en el párrafo anterior, donde se trabajó con 10 kg de maíz, parte desde la recepción, desgranado manual y, clasificación eliminando cualquier tipo de material extraño, secado, molido y, tamizado. La Fig. 1 presenta el diagrama de procesos para la elaboración de harina a partir de maíz suave (*Zea mays L*).

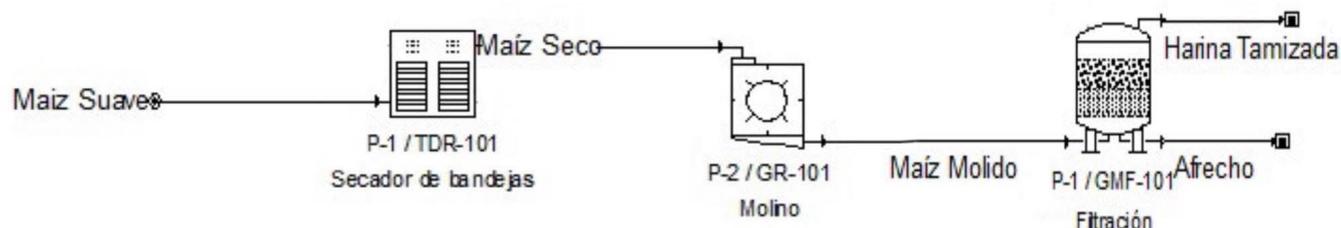


Figura 1. Diagrama de procesos para la elaboración de harina de maíz

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de secado

El maíz tiene una propiedad natural de absorber la humedad y, su calidad después de ser cosechado depende principalmente de su nivel de humedad. El contenido de humedad se refiere al peso total del grano, incluyendo el agua, generalmente a la base húmeda¹². El contenido de humedad para la cinética de secado de maíz inicial fue de 22,13%, cada muestra finalizó con un contenido de humedad de 0,53%; 0,7%; 0,61%. Según Cardador-Martínez et al.,¹³ realiza la cinética de secado por un lapso de 24 h con la diferencia que el peso se registra cada 5 min durante los primeros 30 min, luego a los 45, 60, 90, 120, 150 y 180 min. Hasta lograr que el contenido de agua de equilibrio. Así también, el contenido de agua final fue de 0,10% mientras que en el presente estudio se obtuvo 0,14%

La tabla 1 muestra los resultados de la humedad en base seca, total, en equilibrio y materia seca, base húmeda. La Fig. 2 se observa el peso de la materia, que se vuelve constante a partir de la hora 9.

Variable	Valor
Humedad en base seca	61,00 %
Humedad en base húmeda	69,52 %
Humedad total	97,23 %
Humedad en equilibrio	0,45 %
Materia Seca	2,97 g

Tabla 1. Resultados de humedad a 104 °C

Modelos matemáticos para cinética de secado.

La tabla 2 muestra los modelos matemáticos en base a los datos experimentales, los cuales fueron obtenidos mediante el Software Statgraphics, donde, la elección del modelo cinético de secado más apropiado se fundamentó en los criterios de obtener el coeficiente de determinación más alto¹⁴. Para lo cual se observa que para los 104 °C el mejor ajuste obtenido es el modelo de Henderson y Pabis seguido por el modelo de Page para los datos a 73°C.

Temperatura (°C)	Nombre del Modelo	Ecuación	Parámetros del modelo	Estadísticas
104°C	Newton (Lewis)	$MR = e^{-k \cdot t}$	$k = 0,349$	$R^2 = 90,267 \%$
	Page	$MR = e^{-k \cdot t^n}$	$k = 0,105$ $n = 2,093$	$R^2 = 98,578 \%$
	Henderson y Pabis	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t}$	$k = 0,571$ $a = 1,790$	$R^2 = 99,798\%$
73°C	Newton (Lewis)	$MR = e^{-k \cdot t}$	$k = 0,357$	$R^2 = 95,144 \%$
	Page	$MR = e^{-k \cdot t^n}$	$k = 0,193$ $n = 1,499$	$R^2 = 99,881\%$
	Henderson and Pabis	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t}$	$k = 0,454$ $a = 1,324$	$R^2 = 98,722 \%$

Tabla 2. Modelos estadísticos

La curva de cinética de secado representada en la Fig. 2, según el modelo de Henderson y Pabis muestra que los datos experimentales se ajustan según los criterios de aceptación de coeficiente de determinación (R^2). Que tiene una curva cóncava que representa un decaimiento exponencial¹⁵. Según Malvandi et al.,¹⁶ en su estudio refleja que el valor que más aproxima a 1 en R^2 es el modelo de Page, que se describe como el mejor modelo para describir la cinética de secado a 70°C de granos con un valor de 0.988.

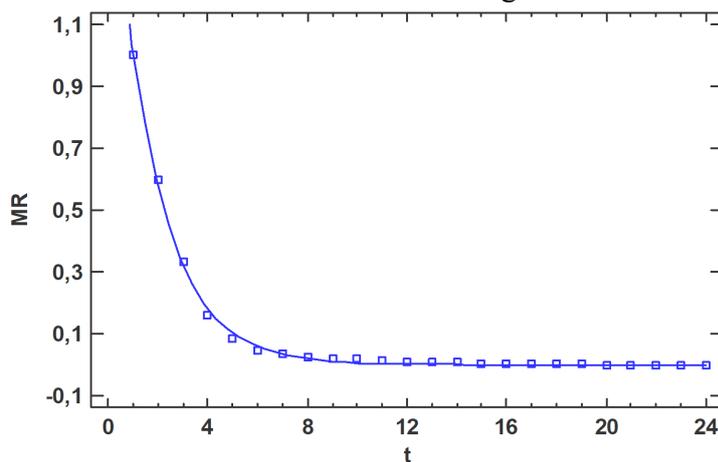
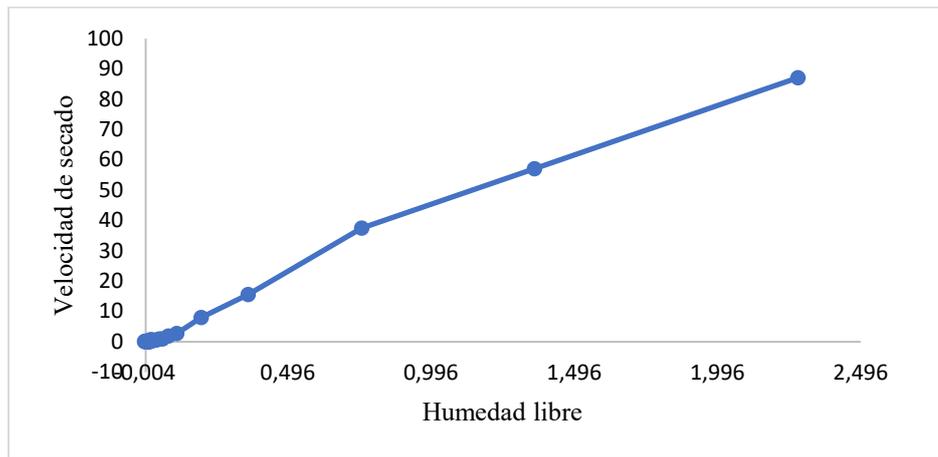


Figura. 1. Cinética de secado a 104°C modelo de Henderson y Pabis

En la velocidad de secado constante se debe tomar en cuenta las condiciones de secado que va a someterse los granos como la temperatura y la velocidad de aire, controlando la evaporación de la humedad mediante la utilización de equipos específicos que demuestren dicho manejo, sin embargo, el proceso de secado incluye la alteración de la transferencia de calor y masa a medida que se evapora por aire caliente realizando cambios en su velocidad de secado vs el tiempo de secado, debido a que mientras mayor cantidad de tiempo pase la humedad de los granos disminuirá considerablemente hasta volverla constante^{17,18}. Por tanto, en la Fig. 3 se observa la curva de velocidad de secado a temperatura de 104 °C, apreciado que, al inicio del proceso su velocidad es más elevada, mientras que con el transcurso del tiempo su velocidad va decreciendo considerablemente en la cual se puede observar el efecto directo de la incidencia en la velocidad del secado.



Nota: En la Fig 3 se leerá el grafico de derecha a izquierda

Figura 2. Velocidad de secado a 104°C

La representación gráfica en la Fig. 4 muestra cómo se relacionan la velocidad de secado y el contenido de humedad en el transcurso de un tiempo t. En este proceso, tanto la estructura del maíz como el transporte de humedad en el producto son factores determinantes en las velocidades de difusión¹⁹.

Para las curvas de secado en un metodo de deshidratacion se debe tener en cuenta el modelo que se vaya a utilizar buscando un ajuste de curva significativo. Según Malvandi et al.,¹⁶ menciona que uno de los metodos con un mayor ajuste es el modelo de Page debido a que el realiza un secado rapido a partir de la remocion de la humedad superficial en alimentos controlando su velocidad de secado y alcanzando su contenido de humedad en equilibrio, sin embargo en la Fig. 3 muestra que la curva de cinética probada en distintos modelos nos indica que el secado a un promedio de temperatura en el deshidratador (73°C), fue ajustada al modelo de Page por su ajuste en los datos experimentales según los criterios de aceptación de coeficiente de determinación (R^2).

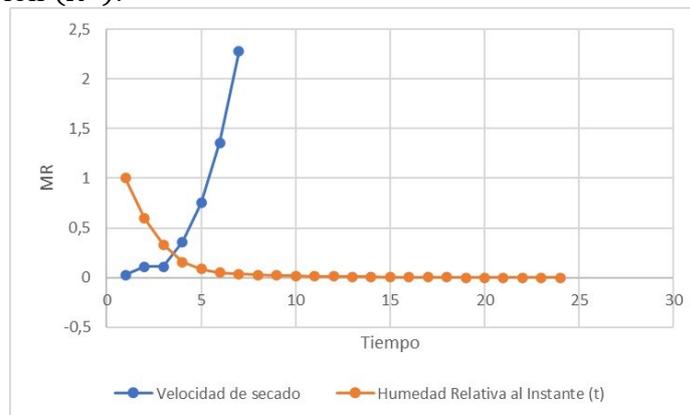


Figura. 3 Interacción de la velocidad de secado y el contenido de humedad en un tiempo t

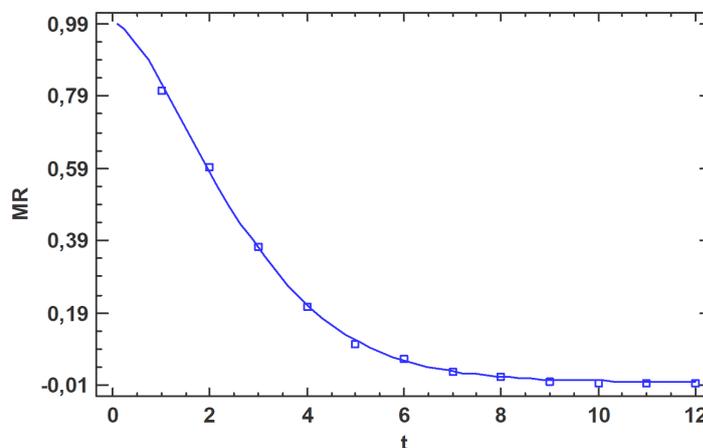


Figura. 4. Cinética de secado a 73 °C modelo de Page

Deshidratación

En un proceso de deshidratación se debe tomar en cuenta la humedad, temperatura y la velocidad de aire, debido a que la reducción del contenido de humedad durante el proceso de secado permite que la actividad microbiana de la materia prima se estabilice evitando el deterioro de la misma, y así obtener una cinética de secado significativa²⁰. Por tal razón, se observa en la Fig. 5, que el maíz obtuvo un peso constante en el transcurso de 12 horas; debido a su velocidad de secado y temperatura, además se observa que en el transcurso de las primeras horas es cuando se pierde mayor contenido de agua. Así también, a los 73 °C el grano presenta una humedad en base seca de 45,25 %, humedad en base húmeda de 68.85 %, humedad total de 81,56 %, la humedad en equilibrio de 0,63 % en un flujo de calor promedio de $8,36 \frac{W}{m^2}$.

CONCLUSIONES

La remoción de humedad en la cinética de secado de maíz suave variedad Guagal INIAP 111 está directamente influenciada por la temperatura y el tiempo. El modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de Henderson y Pabis ($MR = a * e^{-k*t}$; $R^2 = 99,798\%$). Se observó que el proceso llegó a un equilibrio aproximadamente después de 8 horas, con una velocidad de secado variable en las primeras horas del proceso y constante en su etapa final. En el proceso de deshidratación a 73°C el modelo que se ajusta a los datos experimentales es el de Page ($MR = e^{-k*t^n}$; $R^2 = 99,881\%$) donde se observó un equilibrio a partir de la hora 9. Estos resultados indican que es importante considerar cuidadosamente la temperatura y el tiempo en el diseño de procesos de secado para esta variedad de maíz, a fin de lograr una óptima remoción de humedad en el producto final. Además, la cinética de secado implica entender como la humedad se comporta en el maíz durante el proceso de secado a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

1. Fuentes Figueroa, T., PARRALES Quimis, A. D., Morán Morán, J., García Cabrera, J., & Gabriel Ortega J. Caracterización Morfológica Y Etnobotánica Del Maíz Criollo (Zea mays L.) En La Comuna Sancán, Ecuador. UNESUM Ciencias [Internet]. 2022;2(6):101–116. Available from: <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v6.n2.2022.631>
2. Zambrano, J., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sangoquiza, C., Cartagena, Y., Villacrés, E., Garcés, S., Ortíz, R., León, J., Campaña, D., López, V., Asaquibay, C., Nieto, M., Sanmartín, G., Pintado, P., Yáñez, C., & Racines M. Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana (Manual No 122). [Internet]. INIAP. 2022. p. 1. Available from: <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5796>
3. Caviedes-Cepeda, M., Carvajal-Larenas, F., & Zambrano-Mendoza JL. Generación de tecnologías para el cultivo de maíz (Zea mays. L) en el Ecuador. ACI Av En Ciencias e Ing [Internet]. 2022;14(1):1–21. Available from: <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2588>
4. SIPA. Sistema de Información Pública Agropecuaria, Cifras Agroproductivas [Internet]. Ministerio de Agricultura y Ganadería. 2022. Available from: <http://sipa.agricultura.gob.ec/Index.Php/Cifras-Agroproductivas>
5. Quezada N. Estudio de la factibilidad para la implementación de una pyme procesadora de harina de fruta de pan en Santo Domingo [Internet]. 2023. Available from: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11128>
6. Cuenca, A., & Murillo M. Evaluación económica del proceso de secado de maíz para calcular la incidencia en la productividad del proceso [Internet]. 2022. Available from: <https://www.uteq.edu.ec/pt/investigacion/ponencia/664>
7. Delfiya, D. S. A., Prashob, K., Murali, S., Alfiya, P. V., Samuel, M. P., & Pandiselvam R. Drying kinetics of food materials in infrared radiation drying: A review. J Food Process Eng [Internet]. 2022;45(6). Available from: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13810>
8. López-Mejía, N., Andrade-Mahecha, M. M., & Martínez-Correa HA. Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (Cucurbita

Publisher's Note: Bionatura stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open-access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).