

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN EL SECADO DEL GRANO DE CAFÉ MEDIANTE IMÁGENES INFRARROJAS

STUDY OF THERMAL BEHAVIOR DURING COFFEE BEAN DRYING USING INFRARED IMAGING

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO NA SECAGEM DO GRÃO DE CAFÉ POR MEIO DE IMAGENS NO INFRARVERMELHO



Jose Calvay 

Universidad Nacional de San Marcos

Resumen

El presente artículo analizó el comportamiento térmico del grano de café durante el secado solar mediante una simulación digital basada en métodos numéricos y procesamiento de imágenes, con el objetivo de visualizar la distribución térmica aproximada y comprender la influencia de las variaciones de temperatura sobre la calidad final del producto. Para ello, se empleó Google Colab como entorno de trabajo y la librería OpenCV para el procesamiento de imágenes, segmentación del grano y generación de mapas térmicos mediante colormaps, complementados con gráficos de evolución térmica y pérdida de peso simulada. Los resultados evidenciaron la presencia de zonas de calentamiento desigual (hotspots y coldspots), lo que refleja la falta de control térmico en el proceso de secado solar. En conclusión, la simulación constituye una herramienta didáctica, económica y alineada con la Industria 4.0 para el análisis preliminar de procesos de secado agroindustrial.

Palabras Claves: Secado solar, grano de café, simulación digital, procesamiento de imágenes, mapas térmicos, Industria 4.0.

Abstract

This project analyzed the thermal behavior of coffee beans during solar drying using a digital simulation based on numerical methods and image processing. The objective was to visualize the approximate thermal distribution and understand the influence of temperature variations on the final product quality. Google Colab was used as the working environment, and the OpenCV library was employed for image processing, bean segmentation, and the generation of thermal maps using color maps. These were complemented by graphs of thermal evolution and simulated weight loss. The results revealed the presence of uneven heating zones (hotspots and coldspots), reflecting a lack of thermal control in the solar drying process. In conclusion, the simulation constitutes a didactic, cost-effective tool aligned with Industry 4.0 for the preliminary analysis of agro-industrial drying processes.

Keywords: Solar drying, coffee beans, digital simulation, image processing, thermal maps, Industry 4.0.

Resumo

O presente artigo analisou o comportamento térmico do grão de café durante a secagem solar por meio de uma simulação digital baseada em métodos numéricos e processamento de imagens, com o objetivo de visualizar a distribuição térmica aproximada e compreender a influência das variações de temperatura sobre a qualidade final do produto. Para isso, utilizou-se o Google Colab como ambiente de trabalho e a biblioteca OpenCV para o processamento de imagens, segmentação do grão e geração de mapas térmicos por meio de colormaps, complementados com gráficos de evolução térmica e perda de peso simulada. Os resultados evidenciaram a presença de zonas de aquecimento desigual (hotspots e coldspots), o que reflete a falta de controle térmico no processo de secagem solar. Em conclusão, a simulação constitui uma ferramenta didática, econômica e alinhada com a Indústria 4.0 para a análise preliminar de processos de secagem agroindustrial.

Palavras-chave: Secagem solar, grão de café, simulação digital, processamento de imagens, mapas térmicos, Indústria 4.0.

I. INTRODUCCIÓN

El secado agroindustrial es una técnica fundamental para la conservación de alimentos, ya que contribuye a prolongar su vida útil. En los últimos años, esta práctica ha evolucionado gracias a la implementación de tecnologías más avanzadas, como las redes neuronales artificiales (RNA), que permiten modelar problemas científicos y de ingeniería relacionados con el proceso de secado (Aghbashlo, 2015). Según la FAO (2023), el secado consiste en la eliminación parcial o total del agua contenida en un producto mediante la aplicación de calor o aire seco. El objetivo principal de este proceso es reducir la actividad del agua, lo que previene el deterioro microbiano y enzimático, incrementando así la estabilidad del producto y facilitando su almacenamiento y transporte.

El secado de café, como señala Chine (2016), es uno de los procesos más importantes para la preservación de bienes agrícolas, ya que la eficiencia del mismo depende directamente de la transferencia de calor y masa en el producto. Este proceso puede variar dependiendo de las características del material, tales como su composición (CIMMYT, 2023). En este sentido, el estudio realizado por Moreira et al. (2023) indica que el secado puede ser un proceso de bajo costo, siendo influenciado principalmente por factores clave como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad y la dirección del flujo de aire (UNAC, 2021).

La controversia en torno al secado de alimentos radica en la variabilidad del contenido de agua de cada tipo de producto. Para abordar esta variabilidad, se emplean ecuaciones de balance de masa y energía, lo que da lugar a la ecuación general de velocidad de secado inicial (Elustondo et al., 2002). La introducción de la termografía infrarroja como herramienta para monitorear productos durante el secado ha transformado esta técnica en un recurso versátil, útil para diferentes tipos de procesos agroindustriales (Emteborg et al., 2025; Hassoun et al., 2024; Salas y Pizarro, 2025).

II. MÉTODOS

2.1. Procedimiento experimental y computacional

El desarrollo del proyecto se estructuró mediante una metodología híbrida que integra la adquisición de datos físicos con técnicas de procesamiento digital de imágenes (PDI). El flujo de trabajo consistió en tres etapas secuenciales: (i) adquisición de datos mediante muestreo

temporal, que incluyó la implementación de un algoritmo automatizado en Google Colab para controlar la captura periódica de imágenes utilizando una cámara web; (ii) preprocesamiento de imágenes y simulación infrarroja, donde las imágenes RGB fueron convertidas a escala de grises e invertidas matemáticamente con el propósito de simular el comportamiento de una cámara infrarroja, transformando los valores de píxeles oscuros asociados al tostado progresivo por reacción de Maillard en valores altos de intensidad; y (iii) cuantificación y calibración térmica, etapa en la cual se aplicaron algoritmos de visión artificial para segmentar la región de interés correspondiente al grano y calcular la intensidad media de los píxeles como parámetro proxy de temperatura.

2.2. Librerías utilizadas en el entorno Google Colab

Para la ejecución del código computacional se emplearon bibliotecas especializadas de Python. OpenCV (cv2) fue utilizada como núcleo del procesamiento de visión artificial, permitiendo la lectura de imágenes, conversión de espacios de color de BGR a escala de grises, aplicación de mapas de color (COLORMAP_INFERNO) e inversión aritmética de matrices de imagen. NumPy (numpy) fue empleada para el manejo de matrices numéricas y el cálculo de parámetros estadísticos, específicamente el promedio de intensidades de píxeles mediante la función `np.mean`. Matplotlib (matplotlib.pyplot) se utilizó para la generación de gráficas científicas, incluyendo curvas de temperatura en función del tiempo y la visualización de matrices térmicas con escalas cromáticas. Finalmente, las bibliotecas IPython Display y Base64 permitieron establecer la comunicación entre el navegador web y el entorno de ejecución de Python, posibilitando el acceso y control en tiempo real de la cámara web desde la nube.

2.3. Variables físicas y ecuación aplicada

Para modelar el fenómeno de transferencia de calor durante el proceso de tostado del grano de café se aplicó la ecuación de difusión de calor, también conocida como la ecuación del calor o Segunda Ley de Fick para un sólido isotrópico:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta^2 T$$

donde el término $\partial T / \partial t$ representa el cambio temporal de la temperatura, indicando la velocidad de calentamiento de un punto específico del grano a medida que transcurre el

proceso de tostado, variable observable computacionalmente mediante el análisis secuencial de fotogramas. El parámetro α corresponde a la difusividad térmica del material (m^2/s), constante física que expresa la capacidad del grano para conducir energía térmica en relación con su capacidad de almacenamiento de calor. Valores elevados de α implican una rápida penetración térmica hacia el centro del grano, favoreciendo un tostado uniforme, mientras que valores reducidos promueven la acumulación superficial de calor, generando riesgo de quemado externo y un centro insuficientemente tostado. En el café, este parámetro varía dinámicamente debido a pérdidas de humedad y cambios de densidad durante el proceso.

El operador laplaciano $\nabla^2 T$ describe la distribución espacial de la temperatura en el volumen del grano, representando la diferencia térmica entre un punto y su entorno inmediato, la cual actúa como fuerza impulsora del flujo de calor desde regiones de mayor temperatura (superficie o cáscara) hacia regiones más frías (núcleo o endospermo), hasta alcanzar el equilibrio térmico.

III. RESULTADOS

Figura 1: Gráfica de razón de humedad

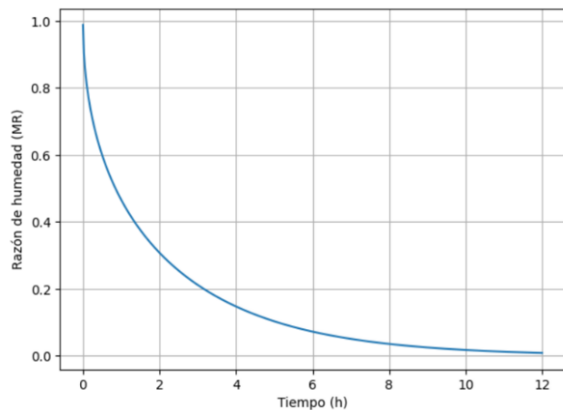


Foto 1 tomada — Temperatura media ≈ 44.54 °C

Foto 2 tomada — Temperatura media ≈ 44.54 °C

Foto 3 tomada — Temperatura media ≈ 44.56 °C

Foto 4 tomada — Temperatura media ≈ 44.45 °C

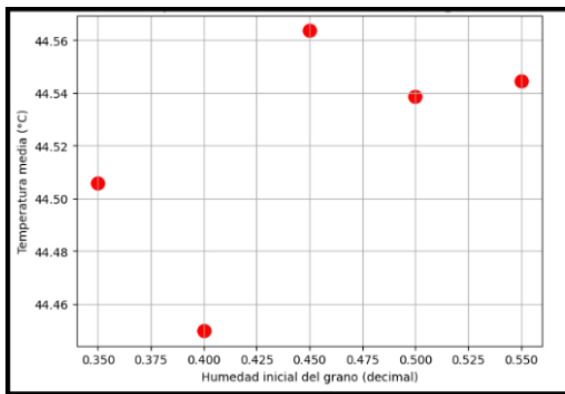
Foto 5 tomada — Temperatura media ≈ 44.51 °C

Tabla 1: Imágenes infrarrojas de las 5 muestras de granos de café

N° de toma	Imágenes normales	Imágenes Infrarrojas
1		
2		
3		
4		
5		

Nota. Imagen a la izquierda (normal): Se muestran granos de café en su estado visible, es decir, con luz visible, donde se aprecian los granos de manera tradicional. Imagen a la derecha (termografía infrarroja): En esta imagen se muestra una termografía infrarroja de los mismos granos de café, donde los colores representan las diferencias de temperatura. Los colores rojos indican áreas con mayor temperatura, mientras que los colores azules y verdes indican zonas más frías. Esto puede ser útil para identificar variaciones térmicas en los granos durante el proceso de secado en estudio de su distribución térmica.

Figura 2: Temperatura media vs humedad inicial del grano



Nota. Difusión térmica estimada del grano: $\alpha = 2.000010 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

En la Figura 1 se observó que la razón de humedad (MR) del grano de café disminuyó de manera exponencial a lo largo del tiempo, alcanzando valores cercanos a 0.05 hacia las 12 horas de exposición solar. Esta tendencia concuerda con el comportamiento típico del secado natural en bandejas o superficies expuestas al sol, donde la velocidad de evaporación es mayor durante las primeras horas debido al elevado gradiente de humedad entre la superficie del grano y el ambiente. Según Vargas (2021), el secado solar del café pergamino presenta una fase inicial de transferencia rápida de humedad que posteriormente se reduce conforme el grano alcanza niveles más bajos de humedad. Este antecedente respalda la caída pronunciada observada durante las primeras 2–4 horas del modelo predictivo.

De manera complementaria, la Figura 2 muestra que la temperatura media del grano varía ligeramente en función de la humedad inicial, con incrementos térmicos mínimos a medida que aumenta el contenido de agua. Este comportamiento es coherente con lo descrito por Krokida et al. (2001), quienes indican que materiales con mayor humedad poseen una capacidad calorífica más alta y una difusividad térmica menor, modulando el calentamiento superficial. Del mismo modo, pequeñas diferencias térmicas como las identificadas en este estudio ($\approx 0.1\text{--}0.2\text{ }^\circ\text{C}$) son características de matrices húmedas durante secado, donde la evaporación y redistribución de agua generan micro gradientes detectables mediante termografía infrarroja. Según Vadivambal y Jayas (2011), este tipo de variaciones sutiles pueden ser captadas con precisión gracias a la alta sensibilidad superficial de la termografía.

Además, la difusividad térmica estimada ($\alpha = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) coincide con valores reportados para

granos y vegetales durante procesos de secado, lo que indica que el modelo numérico reproduce adecuadamente el comportamiento térmico real de este tipo de sustratos (Motevali & Koloor, 2017). Este resultado refuerza que la humedad inicial influye ligeramente en la respuesta térmica del grano y confirma la validez del enfoque termográfico empleado.

En relación con el análisis predictivo, se verificó que es posible generar imágenes térmicas sintéticas a partir de imágenes RGB utilizando modelos de traducción de imagen, tal como se resume en la Tabla 1. No obstante, la fidelidad térmica depende fuertemente de la disponibilidad de datos emparejados y de la similitud entre las condiciones de adquisición y entrenamiento. Khan (2023) reporta que los modelos end-to-end basados en redes generativas pueden traducir RGB a térmico real, pero la calidad obtenida está condicionada por la existencia de pares RGB–IR y una amplia diversidad de escenas.

Finalmente, para mejorar la precisión y robustez del programa, diversos estudios sugieren combinar datos RGB e infrarrojo, ya que trabajar únicamente con RGB requiere correcciones de dominio y calibraciones posteriores. Ben-Shoushan et al. (2023) destacan que la fusión RGB–IR constituye la mejor práctica para aplicaciones térmicas, mientras que, en ausencia de información infrarroja, los modelos deben compensarse mediante calibración vicarious y entrenamiento específico.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten interpretar que el proceso de secado del grano de café presenta un comportamiento térmico y de pérdida de humedad característico de materiales agroindustriales sometidos a exposición solar. La disminución progresiva de la razón de humedad evidencia que, durante las primeras horas del proceso, existe una mayor velocidad de eliminación de agua, debido al gradiente inicial entre la humedad contenida en el grano y las condiciones del ambiente. Esta tendencia concuerda con el principio general del secado, en el cual la evaporación superficial ocurre con mayor intensidad al inicio y disminuye conforme el producto pierde humedad y el agua remanente se encuentra más ligada a la estructura interna del grano.

La curva de razón de humedad observada refleja un comportamiento descendente de tipo exponencial, lo cual resulta coherente con modelos difusivos aplicados al secado de

productos agrícolas. Este resultado permite afirmar que la transferencia de humedad no ocurre de manera lineal, sino que depende de la interacción entre el calor recibido, la estructura física del grano, la humedad inicial y la resistencia interna al movimiento del agua. En ese sentido, el modelo utilizado permite representar de manera aproximada el fenómeno de secado solar, mostrando que la pérdida de humedad se vuelve más lenta a medida que avanza el tiempo de exposición.

En relación con la temperatura media registrada en las muestras, los valores obtenidos se mantuvieron alrededor de 44 °C, con variaciones mínimas entre las tomas analizadas. Aunque estas diferencias térmicas fueron reducidas, su identificación resulta importante, ya que demuestra la sensibilidad del procesamiento digital de imágenes para detectar cambios superficiales que no siempre pueden ser percibidos mediante observación directa. Las pequeñas variaciones de temperatura encontradas pueden asociarse a diferencias en la posición de los granos, el grado de exposición a la radiación solar, la humedad superficial y la redistribución interna del calor durante el proceso de secado.

La presencia de zonas con diferente intensidad térmica en las imágenes procesadas permite discutir la existencia de calentamiento no uniforme en los granos de café. Los mapas de calor generados mediante OpenCV evidencian áreas de mayor y menor temperatura, identificadas visualmente como zonas calientes y zonas frías. Este comportamiento es relevante porque un secado heterogéneo puede influir en la calidad final del producto, generando riesgos como sobrecalentamiento superficial, secado incompleto, pérdida de características sensoriales o deterioro físico del grano. Por ello, el análisis térmico mediante imágenes constituye una herramienta útil para reconocer irregularidades que podrían afectar la eficiencia del proceso.

La relación entre temperatura media y humedad inicial también permite señalar que el contenido de agua del grano influye en su respuesta térmica. Los granos con mayor humedad tienden a presentar una mayor capacidad para absorber calor, pero al mismo tiempo muestran una menor rapidez en el incremento de temperatura, debido al efecto regulador de la evaporación. Este fenómeno confirma que la humedad no solo es una variable de conservación, sino también un factor que modifica la transferencia de calor dentro del material. En consecuencia, controlar la

humedad inicial resulta fundamental para garantizar un secado más uniforme y evitar variaciones que comprometan la calidad del café.

La difusividad térmica estimada, correspondiente a un valor aproximado de $\alpha = 2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, se encuentra dentro de un rango compatible con materiales agrícolas sometidos a procesos de secado. Este valor permite comprender la velocidad con la que el calor se propaga dentro del grano y, por tanto, representa un parámetro importante para el diseño y control de sistemas de secado. Una difusividad térmica baja puede favorecer la acumulación de calor en la superficie, mientras que una mayor difusividad contribuye a una distribución más homogénea de la energía térmica. Por ello, la estimación de este parámetro resulta relevante para proyectar mejoras en procesos de secado artesanal, solar o industrial.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de Google Colab, Python y OpenCV demostró ser una alternativa accesible para el análisis preliminar del comportamiento térmico del café. La conversión de imágenes RGB a escala de grises, la inversión de intensidades y la aplicación de mapas de color permitieron simular una representación infrarroja del grano. Sin embargo, debe precisarse que estas imágenes no reemplazan completamente a una termografía infrarroja real, ya que no provienen de sensores térmicos calibrados, sino de una aproximación computacional basada en intensidad de píxeles. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una simulación didáctica y exploratoria, útil para visualizar patrones térmicos, pero no como una medición térmica absoluta.

En ese sentido, la principal limitación del estudio radica en que la generación de mapas térmicos a partir de imágenes RGB depende de la iluminación, la calidad de la cámara, la distancia de captura y las condiciones del entorno. Estas variables pueden alterar la intensidad de los píxeles y, en consecuencia, modificar la estimación visual de temperatura. Por esta razón, para futuras investigaciones sería recomendable complementar el procesamiento digital con cámaras termográficas reales, sensores de humedad y registros ambientales, a fin de validar experimentalmente la precisión de los mapas térmicos generados.

A pesar de estas limitaciones, los resultados evidencian el potencial del procesamiento de imágenes como herramienta de apoyo para el monitoreo del secado agroindustrial. La simulación permitió observar patrones de

calentamiento, estimar temperaturas medias, representar la pérdida de humedad y analizar la distribución térmica del grano de café de manera económica y replicable. Esto resulta especialmente valioso en contextos educativos, experimentales o productivos donde no se dispone de equipamiento especializado de alto costo.

El análisis desarrollado abre la posibilidad de implementar sistemas de monitoreo más avanzados, basados en cámaras infrarrojas, sensores IoT y algoritmos de control automático. De esta manera, el estudio no solo contribuye a comprender el comportamiento térmico del grano de café durante el secado, sino que también plantea una ruta tecnológica para optimizar la calidad del producto, reducir pérdidas y mejorar la eficiencia energética en procesos de secado.

CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del código y el análisis de la simulación del proceso de secado, se concluye que la implementación de la solución en series de la Ley de Fick para una geometría esférica permitió validar el modelo difusivo, demostrando que la simulación numérica en Python constituye una herramienta eficaz para la predicción de tiempos de secado en función de la difusividad efectiva (Deff), reduciendo la necesidad de experimentación preliminar costosa.

Asimismo, se comprobó el potencial de la visión por computadora mediante el uso de librerías de código abierto (OpenCV) para la extracción de información cuantitativa a partir de imágenes digitales, donde la conversión de escala de grises a mapas de calor facilitó la identificación de patrones de distribución superficial imperceptibles al ojo humano, optimizando así el control automatizado de calidad. Por otra parte, se estableció una relación directa entre las propiedades termofísicas del grano conductividad, densidad y calor específico y su comportamiento térmico, concluyendo que la difusividad térmica (α) es el parámetro determinante para el diseño adecuado de los tiempos de residencia en secadores industriales, evitando el deterioro térmico por sobrecalentamiento. Finalmente, como proyección tecnológica, se propone la integración de cámaras termográficas (sensores FLIR) conectadas al algoritmo en tiempo real mediante IoT, lo cual permitiría ajustar automáticamente la potencia del secador a partir de la temperatura superficial detectada, optimizando el consumo energético y garantizando la inocuidad del producto final.

REFERENCIAS

- [1] Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., & Mujumdar, A. S. (2015). Application of artificial neural networks (ANNs) in drying technology: A comprehensive review. *Drying Technology*, 33(12), 1397-1468. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1036288>
- [2] Alarcón, C., Villacrés, R., & López, J. (2021). El secado agroindustrial como alternativa para la conservación de productos agrícolas. *Revista Pentaciencias*, 6(2), 45-53. Editorial Alema. Recuperado de <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/download/1181/1621/2749>
- [3] Anumudu, C. K., Onyeaka, H., Ekwueme, C. T., Hart, A., Isaac-Bamgboye, F., & Miri, T. (2024). Advances in the Application of Infrared in Food Processing for Improved Food Quality and Microbial Inactivation. *Foods*, 13(24), 4001. <https://doi.org/10.3390/foods13244001>
- [4] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2023). Factores que influyen en el secado del grano. Recuperado de <https://www.cimmyt.org/es/noticias/factores-que-influyen-en-el-secado-del-grano/>
- [5] Chine, B. (2016). Secado de alimentos: fundamentos y aplicaciones en la industria alimentaria. *Agronomía Costarricense*, 40(1), 85-98. Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822016000100062&script=sci_arttext
- [6] Elustondo, Mujumdar, AS y Urbicain, MJ (2002). Condiciones óptimas de operación en el secado de alimentos con vapor sobrecalentado. *Drying Technology*, 20 (2), 381-402. <https://doi.org/10.1081/DRT-120002548>
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b17208/handbook-industrial-drying-arun-mujumdar>
- [7] Emteborg, H., Zeleny, R., Charoud-Got, J., Martos, G., Lüddecke, J., Schellin, H., & Teipel, K. (2014). Infrared thermography for monitoring of freeze-drying processes: Instrumental developments and preliminary results. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 103(7), 2088-2097. <https://doi.org/10.1002/jps.24017>
- [8] FAO. (2023). Conservación de alimentos por secado. Organización de las Naciones

- Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/4/x5028s/X5028S0C.htm>
- [9] Gama-Moreno, L. A., Martínez Hernández, C., Ramírez Molina, A., Torres Rangel, J. A., & Torres Rodríguez, J. L. (2021). Procesamiento de imágenes infrarrojas para detectar deficiencias de nitrógeno de cultivos en ambientes controlados [PDF]. *Research in Computing Science*, 150(4), 231–240. https://rcs.cic.ipn.mx/2021_150_4/Procesamiento%20de%20imagenes%20infrarrojas%20para%20detectar%20deficiencias%20de%20nitrogeno%20de%20cultivos.pdf
- [10] Gowen, A. A., Tsenkova, R., Esquerre, C., & O'Donnell, C. P. (2010). Uso de la espectroscopia e imagenología en el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo (IR) en la tecnología analítica de procesos (PAT) para la industria alimentaria. *Journal of Food Engineering*, 99(4), 361-372. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.003>
- [11] Hassoun, A., Aït-Kaddour, A., Dankar, I., Safarov, J., Ozogul, F. y Sultanova, S. (2024). La importancia de las tecnologías de la Industria 4.0 en la mejora de diversas operaciones unitarias aplicadas en el sector alimentario: enfoque en el secado de alimentos. *Food and Bioprocess Technology*, 18 (1), 109-128. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/guia-de-la-termografia-infrarroja-fenercom-2011.pdf>
- [12] <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/guia-de-la-termografia-infrarroja-fenercom-2011.pdf>
- [13] Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2002). Cinética de secado de algunas verduras. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 321-326. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)0021](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)0021)
- [14] Krokida, MK, Karathanos, VT, Maroulis, ZB, & Saravacos, GD (2001). Cinética de secado de algunas verduras. *Journal of Food Engineering*, 49 (4), 321-326.
- [15] Lewicka, J., Tys, J., & Tys, A. (2015). Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin. *International Journal of Food Engineering*, 11(4), 547-555. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2015-0168>
- [16] Moreira, M., Mancheno, E., Jácome, W., Murillo, M., & Cuenca, A. (2023). Tecnologías de secado y potencial de la agroindustria de trozos secos de yuca en el Caribe colombiano. *Revista Bionatura*, 8(4), 101–109. Recuperado de <https://www.revistabionatura.com/files/nn2023.08.04.101.pdf>
- [17] Motevali, A., & Kolor, R. (2017). Energy saving in food drying processes: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 435-447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.127>
- [18] Redagricola. (2025). La termografía infrarroja resulta eficaz para medir el estrés hídrico por variedad de palto.
- [19] Salas-Silva, M. A., & Pizarro-Medina, C. (2025). Termografía infrarroja para medir índice de estrés hídrico en cultivares de palto (*Persea americana* M.). *Agronomía Costarricense*, 49(1), 1–13. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-13212025000100003&script=sci_arttext
- [20] Sánchez, J. A. (2011). Guía de la termografía infrarroja [PDF]. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (FENERCOM).
- [21] Tomas-Egea, J. A., Traffano-Schiffo, M. V., Castro-Giraldez, M., & Fito, P. J. (2021). Hot air and microwave combined drying of potato monitored by infrared thermography. *Applied Sciences*, 11(4), 1730. <https://doi.org/10.3390/app11041730>
- [22] Universidad Nacional del Callao. (2021). Factores que intervienen en el proceso de secado (Apuntes de clase, Transferencia de Masa II). Recuperado de <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-callao/transferencia-de-masa-ii-2-4-6-4-o-45/factores-que-intervienen-en-el-proceso-de-secado/30416181>
- [23] Vadimbabal, R., & Jayas, DS (2011). Aplicaciones de la termografía infrarroja en el procesamiento de alimentos. *Food and Bioprocess Technology*, 4 (2), 161-174.
- [24] Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2011). Aplicaciones de la termografía infrarroja en el procesamiento de alimentos. *Food and Bioprocess Technology*, 4(2), 161-174. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0424-y>
- [25] Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). Python 3 Reference Manual. CreateSpace.