

Capítulo 2

Energía, eficiencia y calidad en el secado de alimentos: el caso de la verdolaga

Beatriz Castillo-Téllez¹

beatriz.castillo@academicos.udg.mx

Margarita Castillo Téllez²

mcastill@uacam.mx

Martha Fabiola Martín del Campo³

martha.martindelcampo@academicos.udg.mx

Gerardo Alberto Mejía Pérez¹

gerardo.mejia@udg.mx

Alfredo Domínguez Niño⁴

aldoni@ier.unam.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20251963>



¹ Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche

³ Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara

⁴ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Este capítulo analiza la eficiencia energética y la calidad del producto en procesos de secado de alimentos, tomando como caso de estudio la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*). Se evaluaron tres métodos de secado: solar directo, solar indirecto y horno eléctrico a 55°C. El estudio abarca aspectos como el consumo de energía, costos operativos, emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y la conservación de propiedades nutricionales y fisicoquímicas del producto. Los resultados muestran que los métodos solares son significativamente más sostenibles y económicos que el horno eléctrico, logrando eficiencias energéticas del 74.61 % al 92.37 % en los métodos solares frente al 19.59 % del horno. Además, el secado solar directo y, en mayor medida, el indirecto, conservaron mejor las propiedades funcionales del producto, como la actividad antioxidante y el contenido de proteínas crudas. Esto se atribuye al impacto térmico más moderado de los métodos solares, lo que reduce la degradación de compuestos bioactivos sensibles al calor. El análisis de las cinéticas de secado, respaldado por modelos de capa delgada (Newton, Henderson y Pabis), permitió describir el comportamiento del proceso y optimizar su diseño. Los modelos destacaron que los métodos solares ofrecen una distribución más uniforme de la humedad, mejorando la estabilidad del producto durante el almacenamiento. Por otro lado, el horno, aunque rápido, mostró mayores pérdidas de calidad debido a temperaturas más elevadas. El capítulo concluye que la elección del método de secado debe basarse en las prioridades específicas del proyecto: rapidez, sostenibilidad o calidad del producto. Asimismo, se resalta la importancia del secado solar como una herramienta clave para comunidades rurales, dada su accesibilidad, bajo costo y sostenibilidad ambiental. Futuros estudios podrían enfocarse en el desarrollo de sistemas híbridos y su aplicación a otros alimentos funcionales, ampliando el impacto de estas tecnologías.

Introducción

El objetivo principal de este capítulo es analizar la eficiencia energética y la sostenibilidad en el secado de alimentos, empleando la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*) como caso de estudio representativo. Para ello, se explorarán diferentes tecnologías de secado, incluyendo métodos solares y convencionales, con el fin de evaluar su desempeño desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

Este análisis se centra en dos aspectos clave:

1. Eficiencia energética:

- Identificar cómo se utiliza la energía en cada método de secado.
- Comparar el consumo energético, los costos operativos y la eficacia de los sistemas evaluados.
- Explorar el potencial de los métodos de secado solar para maximizar la captación de energía renovable y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

2. Sostenibilidad:

- Cuantificar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas con cada método, destacando el impacto ambiental de los sistemas solares frente al horno eléctrico.
- Evaluar cómo las tecnologías de secado pueden implementarse en comunidades rurales, promoviendo prácticas sostenibles y accesibles.
- Examinar los efectos del secado sobre la calidad nutricional y funcional de los alimentos, asegurando que las propiedades esenciales se conserven.
- El capítulo busca ofrecer una visión integral que combine la teoría y la práctica, mostrando cómo las tecnologías de secado no solo preservan alimentos, sino que también contribuyen al desarrollo sostenible. Los resultados de este análisis servirán como guía para la implementación de tecnologías más eficientes y ambientalmente responsables en la industria alimentaria y en comunidades rurales.

Importancia del secado como método de conservación de alimentos

El secado es uno de los métodos de conservación más antiguos utilizados por la humanidad. Desde tiempos remotos, culturas de todo el mundo han empleado el sol y el viento para preservar alimentos como frutas, hierbas y carnes. Este proceso se basa en la eliminación del agua presente en los alimentos, reduciendo su contenido de humedad hasta niveles que inhiben el crecimiento de microorganismos y la actividad enzimática que causan deterioro (Pala-rosas, 2019).

El secado no solo prolonga la vida útil de los alimentos, sino que también facilita su almacenamiento y transporte. Al reducir el peso y el volumen de los productos, el secado disminuye los costos logísticos y mejora la disponibilidad de alimentos en épocas de escasez o en regiones alejadas (López-Vidaña et al., 2021). Además, este método de conservación mantiene gran parte de las propiedades esenciales de los alimentos, como su sabor, aroma y valor nutritivo, siempre y cuando se realice de manera adecuada (García-Valladares et al., 2024).

En la actualidad, el secado sigue siendo una técnica clave, tanto en industrias modernas como en comunidades rurales. Métodos tradicionales como el secado solar han evolucionado gracias a la incorporación de tecnologías más eficientes, como los secadores solares mixtos y los hornos eléctricos. Estas innovaciones buscan optimizar el proceso, haciéndolo más rápido, controlado y energéticamente eficiente (Pakowski et al., 1995).

La importancia del secado no radica solo en la preservación de alimentos, sino también en su contribución a la sostenibilidad. Al utilizar recursos como la energía solar, se reduce el impacto ambiental asociado con otras técnicas de conservación que requieren altos consumos de energía. Esto convierte al secado en una solución accesible y respetuosa con el medioambiente, especialmente en regiones rurales donde el acceso a la energía es limitado (Castillo-Téllez et al., 2024).

Relevancia energética en tecnologías de secado

El secado de alimentos es un proceso que, aunque fundamental para la conservación, requiere un consumo significativo de energía. En métodos convencionales, como los hornos eléctricos o de combustión, la energía necesaria para calentar el aire y evaporar el agua representa una gran parte de los costos operativos, lo que puede limitar su accesibilidad para comunidades rurales o regiones con recursos limitados (EL-Mesery et al., 2022)

En este contexto, las tecnologías de secado basadas en energía renovable, como los secadores solares, han ganado relevancia debido a su capacidad para reducir el consumo de energía convencional y disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Estos sistemas aprovechan la radiación solar como fuente de calor, lo que los hace sostenibles y económicos, especialmente en zonas con alta disponibilidad solar (Kamfa et al., 2020).

La conservación eficiente de alimentos es un desafío crítico, especialmente en regiones rurales y comunidades indígenas donde los recursos energéticos y económicos son limitados. En este contexto, el secado solar emerge como una tecnología sostenible y de bajo costo que utiliza energía renovable para prolongar la vida útil de productos agrícolas, minimizar el desperdicio y promover prácticas de bajo impacto ambiental. Este método no solo reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables, sino que también se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad energética y mitigación del cambio climático (Desa et al., 2020; Udomkun et al., 2020).

La eficiencia energética de un sistema de secado no solo influye en los costos operativos, sino también en la calidad del producto final. Un control adecuado de la energía utilizada puede preservar mejor las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos, como su color, textura y contenido de antioxidantes. Por esta razón, el diseño y la optimización de tecnologías energéticamente eficientes son fundamentales para garantizar que el secado sea viable desde un punto de vista económico, ambiental y de calidad (Rani y Tripathy, 2023).

Además, la relevancia energética trasciende la dimensión operativa, ya que está directamente vinculada con los objetivos globales de sostenibilidad. La transición hacia sistemas que utilicen fuentes renovables,

como el secado solar, contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono de la cadena de suministro alimentaria. Esto resulta especialmente importante en un mundo donde la demanda de alimentos secos, como frutas, hierbas y especias, sigue en aumento (López et al., 2022). Estudios recientes destacan que los sistemas de secado solar pueden alcanzar eficiencias energéticas elevadas al reducir el tiempo de secado y optimizar la transferencia de calor y masa en los alimentos (Fudholi et al., 2014; Xu et al., 2021).

En el caso de la verdolaga, analizar las tecnologías de secado desde una perspectiva energética permite evaluar su sostenibilidad y su potencial para ser implementadas en comunidades rurales. Estos análisis son esenciales para promover el desarrollo de soluciones prácticas que equilibren eficiencia energética, costos y calidad del producto.

Existen diferentes variaciones en formas, colores y sabores de plantas nativas o endémicas comestibles, de las cuales se obtienen los nutrimentos necesarios que el organismo necesita y utiliza para realizar sus funciones básicas. Dentro de estas plantas nativas encontramos la verdolaga (*Portulaca oleracea* L.). Las verdolagas se consideran como un quelite, el cual se encuentra en proceso de domesticación, pudiendo ser recolectado en las orillas de las parcelas, interior de cultivos básicos, o bien ya sea cultivándose en parcelas individuales; es considerada como una planta herbácea comestible que se distribuye en las regiones templadas y tropicales del mundo. En América se conoce desde épocas precolombinas, además de ser considerada como uno de los vegetales que se consumen considerablemente en sopas y ensaladas en países como Grecia, Líbano y otros del Mediterráneo (Mendoza et al., 2020).

México es un país que cuenta con un sin número de especies vegetales nativas de las cuales el 36 % y 54 % son endémicas, considerado como un país megadiverso, algunas de estas especies son utilizadas como ornato, alimentación y uso medicinal. Dentro de estas especies encontramos la verdolaga o itzmiqilitl (*Portulaca Oleracea* L.) (McClung de Tapia et al., 2014), la cual pertenece a la familia Portulacaceae, conocida como una planta herbácea anual, con distribución cosmopolita. Este tipo de plantas dependen del temporal de lluvias, así que solo se puede encontrar durante el mismo, además, está catalogada como una de las plantas me-

dicinales más comunes, esto según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Astuti et al., 2015). En México el consumo de especies vegetales como las verdolagas (*Portulaca oleracea*), quelites (*Chenopodium spp.*), quintoniles (*Amaranthus spp.*), huazontles (*Chenopodium spp.*) y rome-ritos (*Saueda spp.*), estas especies han sido considerados como recursos de gran importancia para la alimentación de diversas comunidades indígenas, actualmente, estas especies forman parte del consumo cultural y tradicional de la población. Debido a la gran importancia económica local como regional que tiene esta especie (Román-cortés et al., 2018).

Fundamentos del secado de alimentos

Principios básicos del secado:

El secado es un proceso que consiste en la eliminación del agua contenida en los alimentos para garantizar su conservación a largo plazo. Este proceso se basa en dos principios fundamentales: la eliminación de agua libre y ligada, y la transferencia de calor y masa.

Los alimentos contienen dos tipos principales de agua:

- Agua libre, que se encuentra en los espacios intercelulares y se evapora fácilmente al estar poco unida a la estructura del alimento.
- Agua ligada, que está firmemente unida a las moléculas del alimento, como proteínas y carbohidratos, y requiere más energía para ser eliminada.

En las primeras etapas del secado, se elimina principalmente el agua libre, lo que ocurre con mayor rapidez. A medida que el contenido de humedad disminuye, la eliminación del agua ligada se vuelve más lenta, ya que requiere superar fuerzas de unión más intensas (T. Allaf y Allaf, 2014).

Transferencia de calor y masa

Durante el secado, se produce una interacción simultánea entre transferencia de calor, que proporciona la energía necesaria para evaporar el agua y transferencia de masa, que permite la salida del vapor de agua desde el alimento hacia el medioambiente (Tecante, 2009). El calor puede ser suministrado por diversas fuentes, como energía solar o eléctrica, y se

transfiere al alimento a través de conducción, convección o radiación. Al mismo tiempo, el vapor de agua generado se elimina mediante corrientes de aire que reducen la humedad en la superficie del alimento y facilitan el proceso de evaporación.

Existen varios factores que influyen en el secado, tales como a) las propiedades del alimento: como su contenido inicial de humedad, tamaño, forma y composición química. b) condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa y velocidad del aire y c) diseño del equipo de secado: incluyendo el flujo de aire, la fuente de calor y la distribución de las bandejas (Doymaz, 2012).

- Tecnologías de secado utilizadas en la industria:

El secado ha evolucionado significativamente, desde métodos tradicionales que se basan en fuentes naturales de energía hasta tecnologías modernas diseñadas para optimizar el proceso. A continuación, se describen los enfoques más comunes:

- Métodos tradicionales:

Los métodos tradicionales, como el secado al aire libre o al sol, han sido utilizados durante siglos debido a su bajo costo y simplicidad. Estos métodos, aunque efectivos en climas cálidos y secos, presentan limitaciones como:

- Dependencia de las condiciones climáticas.
- Mayor tiempo de secado.
- Exposición a contaminantes y pérdida de calidad del producto.

A pesar de estas limitaciones, siguen siendo ampliamente utilizados en comunidades rurales debido a su accesibilidad.

Tecnologías sostenibles:

1) Secado solar controlado o tecnificado:

Estas tecnologías utilizan secadores solares con sistemas de captación y transferencia de calor que mejoran la eficiencia y reducen la exposición a contaminantes, de manera que representan una opción ecológica que aprovecha fuentes de energía renovable y reduce las emisiones de CO₂.

2) Sistemas híbridos:

Combinan energía solar con fuentes auxiliares (como eléctrica o combustibles), asegurando un secado continuo incluso en condiciones climáticas adversas. Son ideales para aplicaciones industriales que requieren tiempos de secado más predecibles.

3) Hornos eléctricos o de gas:

Ofrecen control preciso de la temperatura y tiempos de secado más cortos; sin embargo, tienen un impacto ambiental y costos operativos más altos debido a su consumo energético (Llavata et al., 2020).

Importancia de la eficiencia energética en el secado

La eficiencia energética es un factor clave en el diseño y operación de tecnologías de secado, ya que afecta tanto los costos como la sostenibilidad del proceso. Su relevancia radica en los siguientes aspectos:

- Reducción de costos operativos: El secado de alimentos es uno de los procesos más intensivos en energía dentro de la industria alimentaria (del 12 % y el 20 % del consumo energético de la industria manufacturera a nivel global) (Malekjani y Jafari, 2018). Una mayor eficiencia reduce el consumo energético, disminuyendo significativamente los costos de operación, especialmente en sistemas industriales.
- Mitigación del impacto ambiental: Las tecnologías energéticamente eficientes, como los secadores solares, minimizan las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo a la lucha contra el cambio climático. La transición a fuentes renovables, como la energía solar, reduce la dependencia de combustibles fósiles y promueve un enfoque más sostenible (Desa et al., 2020).
- Preservación de la calidad del producto: Un control eficiente de la energía utilizada evita el sobrecalentamiento, secados muy lentos o rayos solares dañinos para algunos alimentos que producen la pérdida de nutrientes, antioxidantes y otras propiedades esenciales del alimento (Menon et al., 2020a).

- Viabilidad en comunidades rurales: En regiones con acceso limitado a la electricidad, tecnologías como los secadores solares se convierten en una solución práctica y económica, proporcionando seguridad alimentaria a través de la conservación prolongada de alimentos.

Materiales y métodos

Secado solar

Se utilizó un secador solar mixto, diseñado en el Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara, compuesto por tres partes principales:

- Colector solar plano: Este componente calienta el aire por convección natural.
- Cámara de secado: Con un volumen de 0.038 m^3 , incluye 8 bandejas perforadas distribuidas en 4 niveles verticales, proporcionando un área total de secado de 0.52 m^2 . La radiación solar atraviesa una cubierta de policarbonato transparente, mientras que las paredes laterales están aisladas con policarbonato de 1.27 cm de espesor.
- Chimenea: Permite la salida del aire húmedo desde la cámara de secado, mejorando la eficiencia del proceso. (Figura 1).



Figura 1. SEQ Figura * ARABIC 1. Secador solar utilizado

Secado en horno convencional

La verdolaga fue distribuida uniformemente en charolas de 0.3m×0.2m en un horno eléctrico Horno marca Riossa con rango de temperatura desde ambiente hasta 70°C, con control digital y sensibilidad $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Dimensiones internas: 33 x 30 x 28 cm y una alimentación de 127V, 50/60 ciclos.

Instrumentación utilizada

Para monitorear las variables clave durante el secado y analizar las muestras, se emplearon los siguientes equipos e instrumentos:

- Monitoreo de temperatura y velocidad del aire: Utilizando un sistema Arduino-LabVIEW conectado a una computadora mediante cable ethernet.
- Determinación de humedad: Con una balanza de humedad Ohaus MB45, precisión $\pm 0.01\%$, para muestras de 1 g, evaluadas al inicio y final del proceso.
- Medición de actividad de agua: Realizada con un equipo portátil Rotronic HygroPalm, precisión $\pm 0.01\%$, reportando el promedio de tres mediciones a una temperatura ambiente de $26.5 \pm 1^\circ\text{C}$.
- Medición de temperatura: Con termopares tipo K, calibrados con un calibrador de temperatura Ameter Jofra Instruments, rango de 10°C a -12°C y precisión $\pm 0.04^\circ\text{C}$.
- Pesaje de muestras: Utilizando una balanza de precisión Ohaus Adventure, precisión $\pm 0.001\text{ g}$.

Parámetros analizados:

- Cinéticas de secado: Las cinéticas de secado describen el comportamiento del proceso de eliminación de agua en los alimentos en función del tiempo. Estas curvas permiten identificar cómo la velocidad de secado varía en las distintas etapas del proceso, comenzando con una fase inicial rápida, donde se elimina el agua libre, y continuando con una fase más lenta, donde se elimina el agua ligada.

En este estudio, se analizaron las cinéticas de secado de la verdolaga utilizando tres métodos diferentes: secado solar directo, secado solar

indirecto y secado en horno a 55°C. Los resultados experimentales se modelaron utilizando ecuaciones de capa delgada para predecir y optimizar el comportamiento del proceso.

- Cinéticas de secado de la verdolaga: El contenido inicial de humedad de la verdolaga fue de 99 % y la actividad del agua (a_w) .95. Al final del secado, la actividad del agua disminuyó a 0.4. El secador solar directo alcanzó una temperatura de 59 °C dentro de la cámara de secado, mientras que el secador solar mixto de 78 °C y humedades de 14% y 17 % respectivamente.

La gráfica muestra la evolución del contenido de humedad (g agua/g sólidos secos) en función del tiempo de secado para tres métodos: solar directo, solar indirecto y en horno a 55°C.

En todos los casos, el contenido de humedad disminuye con el tiempo, evidenciando un patrón típico de secado donde el agua libre es eliminada primero, seguida por el agua ligada. El secado en horno a 55°C muestra la mayor eficiencia en la eliminación de humedad. La curva es más pronunciada al inicio, indicando una mayor velocidad de secado y alcanzando un contenido de humedad bajo en menor tiempo. En cuanto al secado solar directo, es casi tan eficiente como el horno a 55°C, especialmente en las primeras etapas del secado. Este método combina exposición directa al calor solar y una buena transferencia de energía, lo que resulta en una rápida pérdida de agua inicial. Por otro lado, el secado solar indirecto, aunque es efectivo, este método es el más lento de los tres. La curva es menos pronunciada, lo que indica una menor velocidad de secado debido a la transferencia indirecta de calor. Esto puede preservar mejor ciertas propiedades del producto, pero a costa de un tiempo de secado más largo.

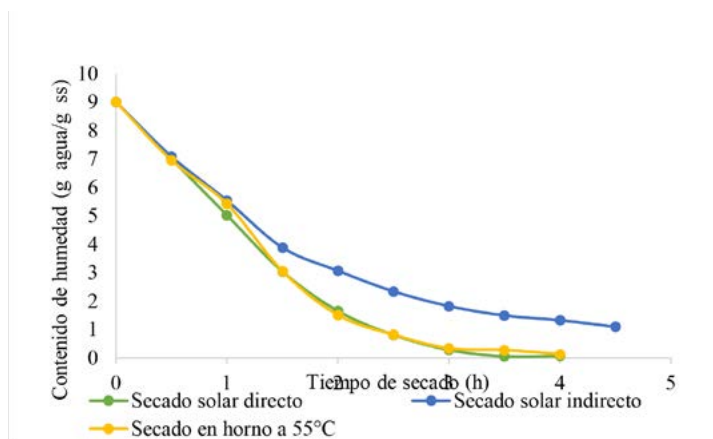


Figura 2. Contenido de humedad con respecto al tiempo de secado.

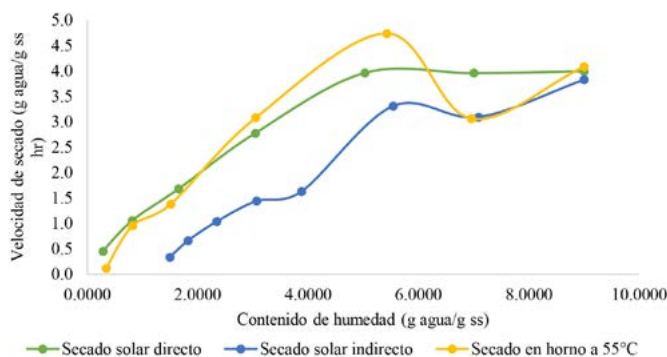


Figura 3. Velocidad de secado solar con respecto al peso de la muestra de verdolaga

La gráfica muestra cómo la velocidad de secado (g agua/g ss·h) varía con el contenido de humedad (g agua/g ss) para los tres métodos de secado: solar directo, solar indirecto y en horno a 55°C. Inicialmente, la velocidad de secado aumenta a medida que se elimina el agua libre, alcanzando un pico máximo, y luego disminuye al eliminarse el agua ligada más difícil de evaporar.

- Secado en horno a 55°C: Este método tiene la mayor velocidad de secado en las primeras etapas y alcanza el pico más alto (~4.5 g agua/g

ss·h), lo que refleja su alta eficiencia para eliminar rápidamente el agua libre. Sin embargo, después del pico, la velocidad disminuye más abruptamente, lo que puede deberse a una mayor eliminación de agua ligada.

- Secado solar directo: Este método es competitivo con el horno en términos de velocidad de secado, pero su pico (~ 4 g agua/g ss·h) es ligeramente menor. Esto lo hace eficiente y energéticamente más sostenible, aunque menos controlado que el horno.
- Secado solar indirecto: Es el método con la menor velocidad de secado en general. Su curva más gradual indica una eliminación más lenta de humedad, lo que puede ser beneficioso para preservar la calidad del producto, aunque a costa de un mayor tiempo total de secado.

Etapas del secado

- Fase inicial: En todos los métodos, la velocidad aumenta rápidamente debido a la eliminación del agua libre, que es más fácil de evaporar.
- Fase intermedia: En el horno y el secado solar directo, la velocidad se mantiene alta por más tiempo, lo que refleja su mayor eficiencia en la transferencia de calor. En el secado solar indirecto, la velocidad es más baja debido a la menor exposición directa al calor.
- Fase final: En todos los casos, la velocidad disminuye notablemente cuando se elimina principalmente el agua ligada, que requiere más energía para evaporarse.

Análisis energético

- Cálculo de la energía utilizada y disponible: El análisis energético comienza con el cálculo de la energía requerida para evaporar el agua de la verdolaga (energía utilizada) y la energía proporcionada por las diferentes fuentes disponibles (energía disponible). Donde la energía utilizada se calcula como:

Energía Utilizada (kJ)=Masa de Agua Evaporada (kg)×Calor Latente (kJ/kg)

- Energía requerida para la evaporación del agua: La cantidad de energía necesaria para evaporar 2.5 kg de agua de la verdolaga, considerando un calor latente de vaporización de 2257 kJ/kg, se estimó en 5642.5 kJ. Este valor representa el objetivo energético que los sistemas de secado deben alcanzar para completar el proceso de eliminación de humedad.
- Energía disponible para el horno:
 $\text{Energía disponible (kJ)} = P(\text{kW}) \times t(\text{h}) \times 3600 (\text{kJ/kWh})$
Donde la potencia es 2 kW, el tiempo de operación fueron 4 horas (de acuerdo con la Figura 2).
Por lo que la energía disponible son 28 800 kJ. Para los sistemas solares, incluye radiación directa, difusa y calor ambiental, desarrollados en la siguiente sección.

Incorporación de radiación directa, difusa y calor ambiental

En los sistemas solares, la energía disponible proviene de múltiples fuentes:

Radiación directa: Energía proveniente del sol, medida en kWh/m²/día, la radiación difusa, que es la energía solar dispersada en la atmósfera, estimada como un porcentaje de la radiación directa (15%) y el calor ambiental es la contribución de la temperatura ambiental al proceso.

Radiación directa:

- Radiación mínima: 4.5 kWh/m²/día.
- Radiación máxima: 5.8 kWh/m²/día.

Radiación difusa:

- Radiación difusa (kJ/m²)=Radiación Directa (kJ/m²)×0.15
- Radiación difusa mínima: $16,200 \times 0.15 = 2,430 \text{ kJ/m}^2$

Calor ambiental:

- Contribución estimada: 1000 kJ/día

Energía total disponible

Para el secado solar directo:

Energía disponible (kJ)=(Radiación directa + Radiación difusa) × A(Área)+Calor Ambiental

Eficiencia de cada método de secado

La eficiencia energética se define como la relación entre la energía útil (energía requerida para evaporar el agua) y la energía total disponible en el sistema de secado:

$$\text{Eficiencia energética (\%)} = \left(\frac{\text{Energía utilizada (kJ)}}{\text{Energía disponible (kJ)}} \right) \times 100$$

Donde la energía utilizada se calcula como:

Energía utilizada (kJ)=Masa de agua evaporada (kg)×Calor latente (kJ/kg)

Para los métodos solares, la energía disponible incluye la radiación directa, difusa y el calor ambiental. En el horno, se calcula a partir de la potencia del equipo y el tiempo de operación (de los tiempos experimentales para alcanzar la humedad de equilibrio que muestra la Figura 2).

El análisis energético de los sistemas de secado evaluados, basado en la radiación solar incidente y las características de los equipos, proporciona información valiosa sobre la eficiencia y el rendimiento energético de los métodos estudiados. A continuación, se resumen los principales hallazgos:

- Energía requerida para la evaporación del agua: La cantidad de energía necesaria para evaporar 2.5 kg de agua de la verdolaga, considerando un calor latente de vaporización de 2257 kJ/kg, se estimó en 5642.5 kJ. Este valor representa el objetivo energético que los sistemas de secado deben alcanzar para completar el proceso de eliminación de humedad.
- Energía disponible en el colector solar: Con un área de colector de 2.52 m² y una eficiencia del 35.17 %, el colector solar puede proporcionar una energía diaria de:
- 13,745.6 kJ/día bajo condiciones de radiación solar mínima (4.5 kWh/m²/día).

- 17,706.8 kJ/día bajo condiciones de radiación solar máxima (5.8 kWh/m²/día).

Esto indica que el colector solar puede generar más del doble de la energía requerida para evaporar el agua, lo que confirma su viabilidad para el proceso de secado en regiones con buena disponibilidad de radiación solar.

- Energía disponible en el secador solar directo: Con un área de secado de 1 m² y una eficiencia del 30 %, el secador solar directo puede proporcionar una energía diaria de:
- Radiación mínima: Incluyendo radiación difusa y calor ambiental: 6108.5 kJ/día.
- Radiación máxima: Incluyendo radiación difusa y calor ambiental: 7564.0 kJ/día.

Este rango de energía disponible es suficiente para cubrir las necesidades energéticas en condiciones de radiación solar máxima, pero puede ser limitado bajo radiación mínima.

Eficiencia energética:

Horno a 55°C:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{28,800} \right) \times 100 = 19.59\%$$

Con lo que concluimos que se tiene una dependencia total de energía eléctrica, con costos altos y emisiones significativas.

Secador solar directo:

Radiación mínima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{6,108.5} \right) \times 100 = 92.37\%$$

Radiación máxima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{7,564.0} \right) \times 100 = 74.61\%$$

Secador solar indirecto:

Radiación mínima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{13,745.6} \right) \times 100 = 41.05\%$$

Radiación máxima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{17,706.8} \right) \times 100 = 31.87\%$$

Estos resultados demuestran que el colector y el secador solares directo son sistemas energéticamente viables para el secado de la verdolaga, con el colector siendo más eficiente bajo condiciones de alta radiación solar y el secador directo dependiendo en parte de fuentes externas para maximizar su eficiencia. En regiones con alta radiación solar, como Colotlán, el secado solar directo puede ser una solución efectiva y sostenible para conservar alimentos como la verdolaga, siempre que se optimice su diseño para mejorar la captación de energía.

El colector solar puede desempeñar un papel crucial como fuente de calor adicional en sistemas híbridos, mejorando la velocidad y uniformidad del proceso de secado.

Impacto en costos y emisiones de CO₂

El costo operativo se calcula considerando el consumo de energía y la tarifa eléctrica:

Costo (USD)=Energía consumida (kWh)×Tarifa eléctrica (USD/kWh)

- Horno a 55°C: $2\text{ kW} \times 4\text{ h} = 8\text{ kWh}$
- Costo = $8 \times 0.10\text{ (USD/kWh)} = 0.80\text{ USD}$

Secado Solar Directo: $0.1\text{ kW} \times 4\text{ h} = 0.4\text{ kWh}$

Costo = $0.4 \times 0.10 = 0.04\text{ USD}$

Los resultados muestran que los sistemas solares son significativamente más económicos, con un ahorro del 95 % frente al horno eléctrico.

Emisiones:

- Horno: $8\text{ kWh} \times 0.5\text{ (kg CO}_2\text{/kWh)} = 4.0\text{ kg CO}_2$
- Secado solar directo: $0.4 \times 0.5 = 0.2\text{ kg CO}_2$

Comparando los métodos, el secado solar mostró una reducción significativa en ambos indicadores:

- Ahorro de costos energéticos: 95 %, pasando de 0.80 USD en el horno eléctrico a 0.04 USD en los sistemas solares.

Reducción de emisiones de CO₂: 95 %, con un ahorro de 3.8 kg de CO₂ por ciclo de secado.

- Comparación entre secado solar y horno.

El análisis comparativo de los métodos de secado, considerando los costos energéticos y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), resalta las ventajas del secado solar frente al horno eléctrico. Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Secado en horno eléctrico

El horno eléctrico, con una potencia de 2 kW y un tiempo de operación de 4 horas, presentó un costo energético de 0.80 USD por ciclo de secado, considerando una tarifa eléctrica de 0.10 USD/kWh. En términos de impacto ambiental, las emisiones generadas alcanzaron los 4.0 kg de CO₂ por ciclo, asumiendo un factor de emisión promedio de 0.5 kg CO₂/kWh, típico en redes eléctricas convencionales.

Secado solar directo e indirecto

Para los métodos de secado solar, se consideró el consumo energético de un ventilador auxiliar con una potencia de 0.1 kW operando durante el mismo periodo de 4 horas. Los costos asociados fueron significativamente menores, con 0.04 USD por ciclo, mientras que las emisiones generadas se limitaron a 0.2 kg de CO₂. Esto resalta el bajo impacto ambiental del secado solar, dado que la mayor parte de la energía proviene del sol, una fuente renovable.

El secado solar, tanto en su modalidad directa como indirecta, representa una alternativa económicamente accesible y ambientalmente responsable para la conservación de alimentos como la verdolaga. Además de los ahorros económicos, el uso de energía solar reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la sostenibilidad en comunidades rurales. Este análisis refuerza la viabilidad del secado solar como una solución adecuada en regiones con alta radiación solar y acceso limitado a redes eléctricas convencionales.

Modelos matemáticos de secado

El secado de alimentos es un proceso dinámico que involucra la transferencia simultánea de calor y masa. Para comprender y optimizar este proceso, se emplean modelos matemáticos que describen la relación entre la humedad del alimento y el tiempo de secado. Entre estos modelos, los de capa delgada son ampliamente utilizados debido a su simplicidad, precisión y aplicabilidad en diversos materiales alimenticios (Castillo-Téllez et al., 2023).

Los modelos de capa delgada permiten ajustar experimentalmente las cinéticas de secado y predecir el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones. Estos modelos se basan en ecuaciones empíricas o semiempíricas que relacionan el radio de humedad (MR) con el tiempo de secado. Al ajustar los datos experimentales a estos modelos, es posible estimar parámetros clave como la constante de velocidad de secado (k) y el exponente (n), los cuales proporcionan información sobre las características específicas del proceso (Patil y Gawande, 2017).

En este estudio, se evaluaron varios modelos de capa delgada, incluidos los de Newton y Henderson y Pabis, para describir las cinéticas de secado de la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*). Los resultados de estos modelos no solo ayudan a interpretar el desempeño de los métodos de secado solar y horno eléctrico, sino que también ofrecen herramientas prácticas para el diseño y optimización de sistemas de secado (Erick César et al., 2020).

Esta sección detalla los fundamentos de los modelos utilizados, los parámetros obtenidos y su relevancia en la predicción del comportamiento del secado en diferentes condiciones ambientales y operativas. Los hallazgos permitirán identificar el modelo más adecuado y su utilidad en aplicaciones futuras.

El uso de modelos matemáticos, como los de Newton y Henderson y Pabis, permite comprender las dinámicas del secado, mejorar los diseños de equipos y aumentar la sostenibilidad de los procesos (Menon et al., 2020b). Estas herramientas son esenciales para analizar la cinética del secado y determinar la eficiencia de los sistemas, especialmente en aplicaciones que combinan métodos tradicionales con tecnologías modernas.

Los modelos de capa delgada aplicados en este estudio se muestran en Tabla 2. El radio de humedad (MR) es una función del tiempo de secado y se calcula como en (Togrul y Pehlivan, 2004):

$$MR = \frac{M_c - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde M_c es el contenido de humedad, M_e es la humedad de equilibrio, y M_0 es el contenido de humedad inicial.

Tabla 1. Modelos de capa delgada aplicados a las cinéticas de secado

Nombre	Modelo	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Liu & Bakker-Arkema, 1997)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	(White et al., 1981)
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Henderson & Pabis, 1961)
Logaritmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Toğrul, 2005)
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang & Singh, 1978)
Weibull	$MR = \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)^\alpha$	(Tzempelikos et al., 2015)

Ajuste de los datos experimentales

En el presente análisis, se evaluaron diferentes modelos de capa delgada aplicados al secado de la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*), incluyendo los modelos presentados en la tabla 1, resultando los de Newton y Henderson y Pabis los que más describen el comportamiento de las cinéticas del secado de verdolaga para las tres tecnologías utilizadas en este trabajo.

Modelo de Newton:

Este modelo describe la cinética de secado mediante una relación exponencial simple. Aunque es útil para representar el comportamiento general del secado, puede ser limitado para procesos más complejos debido a su simplicidad.

En este estudio, el modelo mostró un buen ajuste inicial, con valores de R^2 superiores a 0.95 en algunos casos. Sin embargo, presenta desviaciones en las etapas finales del secado, donde predominan mecanismos de difusión interna.

Modelo de Henderson y Pabis:

Este modelo incluye un parámetro multiplicador (a), que permite una mayor precisión al ajustar las primeras etapas del secado. No obstante, tiende a subestimar las etapas finales del proceso. En este caso, el modelo mostró un desempeño intermedio, con R^2 en el rango de 0.93 a 0.97, dependiendo del método de secado.

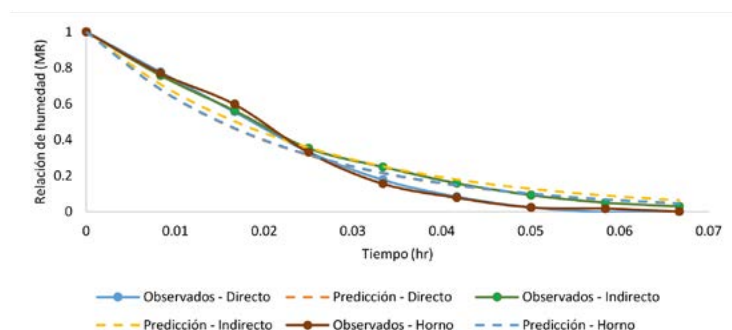


Figura 4. Comparación de datos observados y predicciones de modelos de capa delgada en diferentes métodos de secado

La gráfica muestra la relación de humedad (MR) frente al tiempo para los métodos de secado solar directo, solar indirecto y en horno, comparando los valores experimentales observados con las predicciones de los modelos de capa delgada. Los modelos empleados muestran un buen ajuste a los datos experimentales en los tres métodos de secado.

En cuanto al secado solar indirecto, las predicciones son ligeramente superiores a los valores observados en las fases intermedias, lo que puede deberse a una menor transferencia de calor en comparación con el secado directo. Por último, en el horno, se observa que presenta la mayor congruencia entre datos observados y predicciones, reflejando el control térmico constante del sistema.

Estos resultados destacan la utilidad de los modelos de capa delgada para optimizar procesos de secado, permitiendo predecir tiempos de secado y diseñar sistemas energéticamente eficientes.

Tabla 2. Estadísticas de ajuste para modelos de secado de verdolaga

Método	Modelo	RMSE	R ²
Directo	Newton	0.0631	0.9673
Directo	Henderson y Pabis	0.0583	0.9721
Indirecto	Newton	0.0339	0.9890
Indirecto	Henderson y Pabis	0.0310	0.9908
Horno	Newton	0.0704	0.9598
Horno	Henderson y Pabis	0.0657	0.9650

La Tabla 2 resume el desempeño de los modelos de capa delgada seleccionados (Newton y Henderson y Pabis) aplicados a los tres métodos de secado: solar directo, solar indirecto y horno. Los criterios de evaluación incluyen el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2), los cuales permiten evaluar la precisión del ajuste de los modelos a los datos experimentales. En todos los métodos de secado, los modelos presentan valores de R^2 elevados, lo que indica un buen ajuste entre los datos observados y las predicciones. El modelo Henderson y Pabis tiene un desempeño ligeramente mejor que el modelo de Newton en términos de R^2 para todos los métodos, destacando su mayor capacidad para capturar las complejidades del proceso de secado. Los valores de RMSE son relativamente bajos para ambos modelos, lo que confirma que las diferencias entre los valores predichos y observados son pequeñas. El modelo Henderson y Pabis muestra consistentemente menores valores de RMSE en comparación con el modelo de Newton, lo que refuerza su mejor ajuste en términos absolutos.

Análisis nutricional

El secado de alimentos no solo se centra en la eliminación de agua para su conservación, sino que también influye directamente en las propiedades fisicoquímicas y nutricionales de los productos. Estas propiedades determinan tanto la calidad del alimento como su aceptación por parte del consumidor y su valor como recurso funcional.

Desde una perspectiva fisicoquímica, el secado puede afectar aspectos como la textura, el color y la estabilidad del alimento debido a cambios

estructurales y reacciones químicas provocadas por el calor y la pérdida de agua. Por otro lado, las propiedades nutricionales, como el contenido de proteínas, vitaminas y antioxidantes, también pueden verse alteradas, especialmente en procesos donde las temperaturas son altas o el tiempo de exposición al calor es prolongado.

En este contexto, resulta crucial evaluar cómo los diferentes métodos de secado impactan en estas propiedades. Métodos como el secado solar, al utilizar temperaturas más suaves y un enfoque sostenible, tienden a preservar mejor ciertos nutrientes y características organolépticas en comparación con tecnologías más intensivas como los hornos eléctricos.

Esta sección analiza las principales propiedades fisicoquímicas y nutricionales de la verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) antes y después del secado, considerando factores como la conservación de proteínas crudas, la actividad antioxidante (DPPH y ABTS) y los cambios estructurales. Los resultados permitirán evaluar la viabilidad de los métodos de secado desde una perspectiva integral que considere tanto la calidad del alimento como la eficiencia del proceso.

Cambios en las propiedades nutrimentales de la verdolaga:

- Contenido de proteína cruda.

Para la determinación de actividad antioxidante y de proteína cruda, se utilizaron los métodos colorimétricos de ABTS y DPPH para actividad antioxidante. Para la determinación de proteína cruda se utilizó el método Kjeldahal.

- ABTS

Preparar una solución de ABTS a 7mM, pesando 19 mg de reactivo ABTS en un frasco ámbar y se le añade 4 ml de agua destilada y 88 µl de persulfato de potasio y se deja agitando por lo menos 2 horas y se afora a 5 ml. Para la muestra se hace una dilución de 1:10 de ABTS y se agrega en una placa para lectura en espectrofotómetro 100 µl y 50 µl de muestra y se lee a 734 nm (Gutierrez et al., 2009).

- Actividad antioxidante (DPPH y ABTS).

DPPH: Preparar una solución de DPPH, pesando 3.94 mg del reactivo DPPH y se disuelve en 10 ml de metanol al 100 %, se deja en agitación constante aproximadamente por 12 horas, se afora a 20 ml y se coloca en un frasco ámbar, se refrigera a una temperatura de 4 °C.

Para la determinación de actividad antioxidante se agregan 100 μ l del reactivo (dejar que se atempere antes de usar) y 50 μ l de muestra en microplaca, y leer a 715 nm (Szabo et al., 2007).

- Método Soxhlet para extracto etéreo: Para desgrasar la muestra se utilizó el método Soxhlet, aplicando a la muestra seca, molida y tamizada en maya No. 60, 200ml de éter etílico, dejando destilar aproximadamente por dos horas. (Padrón Márquez et al., 2003).
- Método Kendahl: Este método se utiliza para determinar el porcentaje de proteína cruda (el término de proteína cruda se refiere a que todo el nitrógeno contenido en la muestra no está formado de proteína) de los alimentos, llevando a cabo un proceso de digestión, pesando 1.5 g de muestra en estado seco y desgrasada; se agrega ácido sulfúrico puro y dos pastillas catalizadoras Kendahl. Al terminar la digestión, se deja enfriar a temperatura ambiente y se afora a 100 ml con agua destilada. Para determinar el porcentaje de proteína, se lleva a cabo un proceso de destilación, el cual se lleva a cabo agregando al resultado de la digestión 70 ml de hidróxido de sodio al 4 %. En un matraz de 250 ml se agregan 70 ml de ácido bórico al 4 % y 5 gotas del indicador Shiro Tashiro y se destila hasta alcanzar un volumen de 150 ml (García Martínez et al., 2013).

Comparación entre métodos de secado

La Tabla 3 resume las propiedades nutricionales de la verdolaga fresca y después de ser sometida a secado solar directo e indirecto. Los datos evidencian una reducción en el contenido de proteína cruda y en la actividad antioxidante medida mediante los métodos DPPH y ABTS, lo que refleja los efectos del proceso de secado (Petropoulos et al., 2019).

Tabla 3. *Propiedades nutrimentales de la verdolaga, pre y post tratamiento de secado*

Muestra	% Proteína cruda	Actividad DPPH (mg)	Actividad ABTS (mg)
Fresco	25.9	72.78	1493.246
Secado solar directo	12.47	67.91	1414.933
Secado solar indirecto	13.5	62.96	1056.621

Proteína cruda:

El contenido de proteína cruda disminuyó notablemente tras el secado, con reducciones mayores en el secado solar directo (12.47 %) que en el indirecto (13.5 %). Esto podría deberse a la exposición directa al calor en el método directo, que afecta las proteínas más rápidamente.

Actividad antioxidante (DPPH y ABTS):

- DPPH: La actividad antioxidante medida mediante este método disminuyó ligeramente tras el secado, pasando de 72.78 mg en la muestra fresca a 67.91 mg en el secado directo y 62.96 mg en el secado indirecto. Esto sugiere que, aunque parte de los antioxidantes se conservan, el secado afecta su disponibilidad.
- ABTS: En el método ABTS, la disminución fue más marcada, con valores de 1414.933 mg y 1056.621 mg para los secados directo e indirecto, respectivamente, en comparación con 1493.246 mg en la muestra fresca. Este resultado indica una mayor sensibilidad de estos antioxidantes al calor y al oxígeno durante el secado.
- Implicaciones para la calidad final del producto.

Aunque el secado solar directo es más rápido, este método causa una mayor reducción en la actividad antioxidante y el contenido de proteína cruda, debido a la exposición directa al calor. Sin embargo, conserva mejor estas propiedades que otros métodos más agresivos, como el horno.

Contrariamente, el secado solar indirecto, aunque más lento, preserva

en mayor medida la proteína cruda y la actividad antioxidante medida mediante ABTS, lo que lo hace más adecuado para productos donde la calidad nutrimental es prioritaria Battocchio et al. (2021) encontraron igualmente ventajas en secado solar significativas en la conservación de antioxidantes y vitaminas.

La elección del método de secado de la verdolaga debe alinearse con las prioridades específicas del proyecto, ya sea rapidez, sostenibilidad o calidad del producto.

El secado en horno a 55°C es el más eficiente en términos de tiempo, aunque impacta negativamente en la calidad nutricional, con mayores pérdidas de proteínas y antioxidantes. Sin embargo, el secado solar directo ofrece un equilibrio entre eficiencia energética y sostenibilidad, siendo casi tan rápido como el horno, pero más económico y ecológico, gracias al uso de energía renovable.

El secado solar indirecto, aunque más lento, es ideal para alimentos que requieren un manejo delicado, conservando mejor las proteínas y antioxidantes debido a temperaturas más moderadas y un proceso gradual. El secado solar indirecto conserva mejor la proteína cruda; esta propiedad, mientras que el horno presenta la mayor reducción. Por otro lado, los métodos solares, especialmente el directo, preservan mejor la actividad antioxidante que el horno. Todos los métodos logran niveles efectivos para garantizar la estabilidad del producto, pero el secado solar indirecto podría ofrecer una mayor uniformidad en la distribución de la humedad.

Conservación de compuestos bioactivos: La menor pérdida de actividad antioxidante en los métodos solares sugiere que estos preservan mejor los compuestos bioactivos de la verdolaga, tal como (Uribe et al., 2020) encontraron en sus análisis. Esto tiene implicaciones importantes para el desarrollo de productos funcionales o nutraceuticos, donde la retención de antioxidantes es fundamental para su valor agregado.

Discusión general

Relación entre eficiencia energética y calidad del producto

Los resultados muestran que los métodos solares, especialmente el indirecto, destacan por su alta eficiencia energética (74.61 % a 92.37 %) y mejor conservación de proteínas y actividad antioxidante en comparación con el horno eléctrico (eficiencia del 19.59 %). Aunque el horno ofrece tiempos de secado más rápidos, provoca mayores pérdidas nutricionales debido a temperaturas constantes más elevadas.

El secado solar es más económico, con un ahorro del 95 % en costos energéticos y menores emisiones de dióxido de carbono (CO_2), lo que refuerza su viabilidad como alternativa sostenible y eficiente. Este método es ideal para aplicaciones donde la calidad del producto, en términos de nutrientes y compuestos bioactivos, es prioritaria.

Los métodos solares equilibran eficiencia energética, sostenibilidad y preservación de calidad, convirtiéndolos en opciones adecuadas para el secado de alimentos como la verdolaga.

Viabilidad del secado solar para comunidades rurales

Los métodos de secado solar son soluciones accesibles y sostenibles para comunidades rurales, gracias a su uso de energía solar gratuita y su bajo costo operativo (un 95 % más económico que el horno eléctrico). Estos sistemas reducen las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y contribuyen a la mitigación del cambio climático, haciendo que sean opciones responsables ambientalmente.

Además, el secado solar conserva alimentos como la verdolaga, prolongando su disponibilidad y preservando su valor nutricional, lo que mejora la seguridad alimentaria local. Su simplicidad facilita su implementación y mantenimiento, promoviendo la autonomía y el empoderamiento de las comunidades, al tiempo que fomenta el desarrollo económico mediante la producción de alimentos deshidratados con valor agregado. El secado solar es una herramienta clave para la sostenibilidad y el desarrollo rural, equilibrando accesibilidad, calidad alimentaria y responsabilidad ambiental.

Referencias

- Allaf, T., & Allaf, K. (2014). *Instant Controlled Pressure Drop (D. I. C.) in Food Processing, From Fundamental to Industrial Applications (K. Allaf & T. Allaf (eds.))*. Springer.
- Astuti, S. I., Arso, S. P., & Wigati, P. A. (2015). *VERDOLAGA: una alternativa saludable. Analisis Standar Pelayanan Minimal Pada Instalasi Rawat Jalan Di RSUD Kota Semarang*. 3, 103–111.
- Battocchio, C., Bruni, F., Di Nicola, G., Gasperi, T., Iucci, G., Tofani, D., Varesano, A., & Venditti, I. (2021). Solar cookers and dryers: Environmental sustainability and nutraceutical content in food processing. *Foods*, 10(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/foods10102326>
- Castillo-Téllez, B., Castillo Téllez, M., Campo, M. F. M. del, González, E. O. Z., Domínguez Niño, A., & Mejía-Pérez, G. A. (2024). Enhancing the Circular Economy. *Sustainability*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/su16156593>
- Castillo-Téllez, B., Téllez, M. C., López-Vidaña, E. C., Domínguez Niño, A., Mejía-Pérez, G. A., & Vega-Gómez, C. J. (2023). Temperature–air velocity association, experimental and modeling study of stevia leaves solar drying. *Energy Exploration and Exploitation*, 41(5), 1802–1818. <https://doi.org/10.1177/01445987231176308>
- Desa, W. N. Y. M., Fudholi, A., & Yaakob, Z. (2020). Energy-economic-environmental analysis of solar drying system: A review. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 1011–1018. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1011-1018>
- Doymaz, I. (2012). Air-drying characteristics, effective moisture diffusivity and activation energy of grape leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(2), 161–168. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00557.x>
- EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
- Erick César, L.-V., Ana Lilia, C.-M., Octavio, G.-V., Isaac, P. F., & Rogelio, B. O. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type

- solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*, 147, 845–855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.018>
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 99, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.soler.2013.10.019>
- García-Valladares, O., Domínguez-Niño, A., Lucho-Gómez, A. M., Jiménez-Montiel, A. G., Rodríguez-Mendoza, A. S., Castillo-Téllez, B., Luna-Flores, M., & Castillo-Téllez, M. (2024). Mixed-Mode Solar Drying and its Effect on Physicochemical and Colorimetric Properties of Zompante (*Erythrina Americana*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 194–201. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01147-0>
- García Martínez, E., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (2013). *Aplicación de la determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl. Valoración con una base fuerte*. ETSIAMN. Universidad Politécnica de Valencia, 1–7.
- Gutierrez, G., Acevedo, A., Ballarte, N., Llajaruna, P., Aquise, S., Espinoza, T., & Jacobo, Q. (2009). *Antocianinas , fenoles totales y actividad antioxidante de las corontas del maíz morado (Zea mays L .): Método de extracción*.
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory II: Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 169–174.
- Kamfa, I., Fluch, J., Bartali, R., & Baker, D. (2020). Solar-thermal driven drying technologies for large-scale industrial applications: State of the art, gaps, and opportunities. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 9864–9888. <https://doi.org/10.1002/er.5622>
- Liu, Q., & Bakker-Arkema, F. W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 66(4), 275–280. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0145>
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2019.12.001>

- López-, E. C., Niño, A. D., García-, O., Isaac, V., Figueroa, P., Castillo, M., & Beatriz, T. (2022). *Indirect and mixed- mode solar drying and its effect on physicochemical properties of raw and cooked chicken breast meat*. June, 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16848>
- López-Vidaña, E. C., Castillo Téllez, M., Pilatowsky Figueroa, I., Santis Espinosa, L. F., & Castillo-Téllez, B. (2021). Moisture sorption isotherms, isosteric heat, and Gibbs free energy of stevia leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15016>
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>
- McClung de Tapia, E., Martínez Yrizar, D., Ibarra Morales, E., & Adriano Morán, C. C. (2014). Los orígenes prehispánicos de una tradición alimentaria en la cuenca de México. *Anales de Antropología*, 48(1), 97–121. [https://doi.org/10.1016/s0185-1225\(14\)70491-6](https://doi.org/10.1016/s0185-1225(14)70491-6)
- Mendoza, R., Poma, D., Purizaca, J., & Sullcaray, J. (2020). *Evaluación de polifenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante in vitro a partir de extractos de hojas de verdolaga (portulaca oleracea l.) de la región Piura, Perú*.
- Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020a). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science and Technology*, 100(June 2019), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>
- Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020b). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 67–76. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.03.014>
- Padrón Márquez, B., Oranday Cárdenas, M., Rivas Morales, C., & Verde Star, M. (2003). Identificación de compuestos de Melia, Azaderach, Syzgium aromaticum y Zinnamomum Zeylanicum con efecto inhibitorio sobre bacterias y hongos. *Ciencia UANL*, 6(3), 333–338.

- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. M. S. Thesis. Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Pakowski, Z., Mujumdar, A. S., & Mujumdar, A. S. (1995). *Handbook of Industrial Drying*: Vol. null (2nd (ed.)).
- Pala-rosas, I. (2019). Current Drying Processes. In *Current Drying Processes*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78916>
- Patil, R. C., & Gawande, R. R. (2017). Mathematical modeling of solar drying systems. In *Green Energy and Technology* (Vol. 0, Issue 9789811038327). https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_9
- Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Dias, M. I., Vasilakoglou, I. B., Petrotos, K., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). *Nutritional value, chemical composition and cytotoxic properties of common purslane (Portulaca oleracea L.) in relation to harvesting stage and plant part*. In *Antioxidants* (Vol. 8, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/antiox8080293>
- Rani, P., & Tripathy, P. P. (2023). Drying characteristics and performance acceleration of a mixed-mode solar dryer using finned collector for pineapple slice drying. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05107-7>
- Román-cortés, N. R., García-mateos, M. R., Castillo-gonzález, A. M., Sahagún-castellanos, J., & Adelina, M. (2018). *Características nutricionales y nutraceuticas de hortalizas de uso ancestral en México nutritional and nutraceutical characteristics of vegetables of ancestral use in Mexico*. 41(3), 245–253.
- Szabo, M. R., Idrîoiu, C., Chambre, D., & Lupea, A. X. (2007). Improved DPPH determination for antioxidant activity spectrophotometric assay. *Chemical Papers*, 61(3), 214–216. <https://doi.org/10.2478/s11696-007-0022-7>
- Tecante, A. (2009). *Fundamentos de secado, extracción solido-líquido y destilación. Fundamentos de Secado, Extracción Sólido-Líquido y Destilación*. 1–73.
- Toğrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71(3), 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.031>

- Togrul, T. I., & Pehlivan, D. (2004). No Title. *J. Food Eng.*, 65(null), 413.
- Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaritis, D. P. (2015). Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(3), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.12.002>
- Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B., & Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268, 110730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>
- Uribe, E., Pardo-Orellana, C. M., Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K. S., Pastén, A., García, V., & Aubourg, S. P. (2020). Effect of drying methods on bioactive compounds, nutritional, antioxidant, and antidiabetic potential of brown alga *Durvillaea antarctica*. *Drying Technology*, 38(14), 1915–1928. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1679830>
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *American Society of Agricultural Engineers*, 78, 3001. <https://doi.org/10.1081/E-EEE2-120046011>
- White, G. M., Ross, I. J., & Poneleit, C. G. (1981). Fully-exposed drying of popcorn. *European Physical Education Review*, 24(2), 466–468, 475. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/17506200710779521>
- Xu, B., Wang, D., Li, Z., & Chen, Z. (2021). Drying and dynamic performance of well-adapted solar assisted heat pump drying system. *Renewable Energy*, 164, 1290–1305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.104>