



**INFLUENCIA DEL SECADO ASISTIDO POR BOMBA DE CALOR EN EL
CONTENIDO DE LICOPENO DE LA CÁSCARA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*)**

Trabajo de grado

Autores

Johan Estiven Perez Soto

Valentina Cano Palacio

Director

Juan Carlos Gómez Daza, PhD.

Codirector

José Hipólito Isaza Martínez, PhD.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Alimentos - 3753
Cali - Colombia
2025

DEDICATORIA

A mi madre, quien con su valentía fue madre y padre a la vez. Con esfuerzo inquebrantable y amor infinito, me enseñó—sin saberlo—que la confianza en uno mismo es la llave para abrir cualquier puerta. Gracias a ella, más allá de este título, llevo en mí el reflejo de una mujer fuerte, con carácter y mucho coraje.

Como escribió Isabel Allende: “Somos el resultado de miles de generaciones de madres fuertes que transmitieron, de una a otra, la lección de que en la vida lo importante no es lo que nos pasa, sino cómo lo enfrentamos”.

Madre, tu fortaleza es mi mayor herencia. Este logro es tan tuyo como mío.

-Valentina Cano Palacio-

Dedico este trabajo a Dios, quien con su infinita misericordia me brindó su favor y protección, porque “encomienda al Señor tus obras y tus pensamientos serán afirmados” -Proverbios 16:3-

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque el Señor tu Dios estará contigo en donde quiera que vayas” -Josué 1:9-

Finalmente, “todo tiene su tiempo, y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora”, “no nos cansemos, pues, de hacer el bien; porque a su tiempo segaremos, si no desmayamos”

—Eclesiastés 3:1, Gálatas 6:9-

-Johan-

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía en este camino, por darme la sabiduría para aprender, la fortaleza para seguir adelante y la disciplina para culminar esta etapa. Sin la confianza en Él y en su propósito, este logro no habría sido posible.

A la Universidad del Valle, por haber sido mi espacio de crecimiento personal y profesional.

A cada profesor que con su conocimiento y dedicación dejó huella en mi formación, especialmente a los profesores Juan Carlos Gómez y José Hipólito Isaza, quienes nos apoyaron en cada paso de este trabajo.

A mi compañero de trabajo de grado, quien fue mi apoyo incondicional en cada reto, un compañero de lucha en este viaje y, sobre todo, mi amigo.

Finalmente, a mí misma. Por no rendirme cuando el camino se puso difícil, por convertir cada obstáculo en una oportunidad de aprendizaje. Hoy celebro este logro lleno de gratitud y orgullo.

-Valentina Cano Palacio-

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

Extiendo mi gratitud a los miembros del grupo de investigación GIPNA, por brindarme un entorno enriquecedor para el aprendizaje y el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos cercanos, gracias por su comprensión y por estar presentes incluso cuando el tiempo era escaso. Su compañía fue un refugio durante los momentos difíciles.

Finalmente, a mi familia, mi mayor fuente de fortaleza y amor. Gracias por creer en mí siempre y por ser el motor que me impulsa a seguir adelante.

A todos ustedes, gracias.

-Johan-

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Generalidades del tomate.	13
2.1.1. Importancia.....	13
2.1.2. Características.....	14
2.1.3. Tomasa.....	14
2.2. Indicadores de calidad del tomate deshidratado.....	14
2.2.1. Licopeno.	14
2.2.2. Color.	17
2.3. Métodos de secado para la deshidratación del tomate.	19
2.3.1. Secado de alimentos.	19
2.3.2. Secado asistido por bomba de calor (SBC).	19
3. ANTECEDENTES	21
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	27
5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	28
6. JUSTIFICACIÓN	29
7. HIPÓTESIS.....	30
8. OBJETIVO GENERAL.....	30
8.1. Objetivos específicos.....	30
9. METODOLOGÍA	31
9.1. Obtención del tomate.	31
9.2. Selección y preparación del tomate.....	31

9.3. Deshidratación de la cáscara de tomate.....	32
9.3.1. Descripción del secador asistido por bomba de calor (SBC).	32
9.3.2. Cálculo del contenido de humedad inicial de las muestras de cáscara de tomate.	33
9.3.3. Proceso de secado de la cáscara de tomate.....	33
9.4. Medición de color.....	35
9.5. Extracción y cuantificación del licopeno.	36
9.5.1. Extracción con solventes orgánicos asistida por ultrasonido.	36
9.5.2. Cuantificación del licopeno por método espectrofotométrico.....	37
9.6. Diseño experimental.....	38
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
10.1. Análisis estadístico.....	40
10.2. Secado cáscara de tomate por el sistema SBC.	41
10.3. Análisis colorimétrico de muestras de cáscara deshidratada.	46
10.4. Estimación de la concentración de licopeno en muestras de cáscara de tomate deshidratadas.	54
11. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	61
12. CONCLUSIONES	62
13. BIBLIOGRAFÍA	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del licopeno.	15
Figura 2. Espacio de color CIELAB.	18
Figura 3. Esquema del secador asistido por bomba de calor.	20
Figura 4. Diagrama general del proceso.	31
Figura 5. Fotografía del sistema del secador asistido por bomba de calor SBC.....	33
Figura 6. Cáscara de tomate dispuesta en las bandejas del secador asistido por bomba de calor SBC.....	35
Figura 7. Extracción de licopeno. a) Obtención del polvo de cáscara de tomate deshidratada, b) Ultrasonido de muestras en solventes y c) Dilución de extractos de carotenoides para espectrofotometría.....	37
Figura 8. Variación de la velocidad de secado DR de cáscara de tomate por el sistema SBC....	42
Figura 9. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre la velocidad de secado DR (kg/h).	42
Figura 10. Variación de la velocidad específica de extracción de humedad SMER de cáscara de tomate por el sistema SBC.....	44
Figura 11. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre la velocidad específica de extracción de humedad SMER (kg/kWh).	44
Figura 12. Variación del consumo específico de energía SEC en el secado de cáscara de tomate por el sistema SBC.....	45
Figura 13. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre el consumo específico de energía SEC (kWh/kg).	46
Figura 14. Cambio porcentual de color rojo (Δa^*) (en valor absoluto) de cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC.....	52
Figura 15. Cambio porcentual en la pureza del color (ΔC^*) (en valor absoluto) de cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC.....	52
Figura 16. Cambio de color total porcentual (ΔE) de cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC.....	53
Figura 17. Concentración de licopeno en cáscaras de tomate deshidratadas por el sistema SBC.	57

Figura 18. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre la concentración de licopeno (mg/100g).....	57
Figura 19. Concentración de β -caroteno en cáscaras de tomate deshidratadas por el sistema SBC.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de licopeno en diversos productos alimenticios.....	16
Tabla 2. Antecedentes acerca de la extracción de licopeno del tomate.	21
Tabla 3. Investigación acerca de la utilización del secado asistido por bomba de calor en productos agrícolas.	24
Tabla 4. Tratamientos de secado de cáscara de tomate en el SBC.	40
Tabla 5. Cálculo del contenido de humedad final de las muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC.....	41
Tabla 6. ANOVA para el cambio porcentual en la tonalidad del color Δh^*	47
Tabla 7. ANOVA para el cambio porcentual en la pureza del color ΔC^*	48
Tabla 8. ANOVA para el cambio porcentual de color rojo Δa^*	48
Tabla 9. ANOVA para el cambio porcentual en el color total ΔE	49
Tabla 10. Cambio de color en muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC.	50
Tabla 11. Cambio de color porcentual en muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC.	51
Tabla 12. ANOVA para la concentración de licopeno (mg/100g).	55
Tabla 13. ANOVA para la concentración de β -caroteno (mg/100g).	55
Tabla 14. Estimación de la concentración de licopeno y β -caroteno en cáscaras de tomate deshidratadas por el sistema SBC.	56

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue establecer las bases teóricas y definir los principales parámetros, variables de control y factores que alteran los procesos de secado, extracción y cuantificación de licopeno en cáscaras de tomate. Se identificaron los parámetros de calidad de mayor importancia para este subproducto, además del método de secado que se consideró idóneo para realizar la experimentación, en este caso, el sistema de secado asistido por bomba de calor (SBC), el cual ha garantizado buenos resultados en cuanto al comportamiento de compuestos termolábiles de productos agrícolas durante el proceso de secado. En cuanto al proceso de secado y extracción, la principal variable de respuesta que se analizó fue la concentración de licopeno (mg/100g b.h.) en las muestras de cáscara de tomate deshidratada, a través de la determinación de parámetros como alteración del color, velocidad de secado DR y consumo específico de energía SEC. Para esto se estableció un diseño experimental factorial que relacionó la influencia de la humedad relativa (10, 20 y 30%), la velocidad del aire (0.5, 1 y 1.5 m/s) y su posible interacción en cada uno de los parámetros nombrados anteriormente y; por ende, en la cantidad de licopeno disponible (mg/100g b.h.) para la extracción y estimación por el método espectrofotométrico. Los resultados indicaron que los tratamientos de secado a 10% HR (60 °C) y 1.5 m/s, presentaron los mejores resultados en cuanto a la velocidad de secado DR (0.032 kg/h) y la concentración de licopeno (56.6 mg/100g) y β -caroteno (18.2 mg/100g). El tratamiento de secado bajo condiciones de operación de 30% HR y 0.5 m/s presentó los valores más bajos para el consumo específico de energía SEC (0.1453 kWh/kg) y más altos para la velocidad específica de extracción de humedad SMER (6.884 kg/kWh). Por otro lado, el tratamiento con 20% HR (50 °C) y 1 m/s fue el que presentó menores alteraciones porcentuales en los parámetros de color Δa^* (10.65%), ΔC^* (20.29%) y ΔE (8.26%), además de una alta concentración de licopeno (53 mg/100g b.h.). Estos hallazgos permiten concluir que existe una interacción significativa entre los factores humedad relativa y velocidad del aire y su correcta elección puede conducir a la obtención de resultados específicos en cuanto a los parámetros que gobiernan el proceso de secado de productos agrícolas.

Palabras clave: *Licopeno, Secado asistido por bomba de calor, Cáscara, Espectrofotometría.*

ABSTRACT

The aim of this project was to establish the theoretical foundations and define the main parameters, control variables, and factors that influence the drying, extraction, and quantification processes of lycopene in tomato peels. Key quality parameters for this by-product were identified, along with the most suitable drying method for experimentation: the heat pump-assisted drying system (HPD), which has proven effective in preserving thermolabile compounds in agricultural products during dehydration processes. The main response variable analyzed was the lycopene concentration (mg/100g d.b) in the dehydrated tomato peel samples. This was assessed through indicators such as color changes, drying rate, and specific energy consumption. A factorial experimental design was implemented to evaluate the effect of air relative humidity (10, 20 and 30%) and air velocity (0.5, 1 y 1.5 m/s), as well as their possible interaction, on the aforementioned parameters and consequently on the available lycopene content, determined through spectrophotometric methods. The results indicated that the drying treatments at 10% relative humidity (60 °C) and 1.5 m/s showed the best outcomes in terms of drying rate (DR) (0.032 kg/h) and concentrations of lycopene (56.6 mg/100g) and β -carotene (18.2 mg/100g). The drying treatment under operating conditions of 30% relative humidity and 0.5 m/s presented the lowest values for specific energy consumption (SEC) (0.1453 kWh/kg) and the highest values for specific moisture extraction rate (SMER) (6.884 kg/kWh). On the other hand, the treatment with 20% relative humidity (50 °C) and 1 m/s showed the lowest percentage changes in color parameters Δa^* (10.65%), ΔC^* (20.29%), and ΔE (8.26%), along with a high lycopene concentration (53 mg/100g d.b.). These findings allow us to conclude that there is a significant interaction between the factors of relative humidity and air velocity, and their proper selection can lead to specific outcomes regarding the parameters that govern the drying process of agricultural products.

Keywords: *Lycopene, Heat pump-assisted drying, Tomato-peel, Spectrophotometric.*

1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es un fruto con un elevado valor nutricional debido a que incluye proteínas, hidratos de carbono, fibra, ácido fólico, ácido tartárico, ácido succínico y ácido salicílico, además de ser fuente una fuente primaria de carotenoides como licopeno y β -caroteno (Pataro et al., 2018). El tomate es uno de los cultivos más importantes a nivel global, representando cerca del 30% de la producción hortícola mundial. Su diversidad genética es amplia, especialmente en especies silvestres, las cuales destacan por su alto contenido de licopeno, vitaminas A, C y flavonoides. Es un fruto que se puede consumir en fresco y procesado; por ejemplo, en polvo, el cual es comúnmente utilizado para sopas instantáneas, aderezos, salsas, sazónadores, entre otros (Candelas et al., 2005).

El secado es una operación unitaria en la que se produce en simultáneo un transporte de calor y masa. La transferencia de energía ocurre desde el medio circundante hacia la superficie con el fin de evaporar la humedad superficial y simultáneamente la transferencia de humedad interna hacia la superficie del sólido para su posterior evaporación (Padilla-Frías et al., 2018). Dicho proceso permite preservar alimentos altamente perecederos, especialmente frutas y hortalizas cuyo contenido de agua es típicamente superior al 90%. El principal objetivo de esta tecnología al reducir el contenido de humedad de los alimentos es disminuir la actividad enzimática y acción microbiana sobre el alimento (Ochoa-Reyes et al., 2013). No obstante, las condiciones del proceso influyen directamente en las propiedades del producto final, incluyendo el color, la textura, el valor nutricional y el contenido residual de humedad (Padilla-Frías et al., 2018).

Si bien algunos productos toleran temperaturas elevadas durante el secado, otros, como el tomate, son termosensibles y requieren un tratamiento a temperaturas moderadas. El tomate es una fruta con alto contenido de compuestos termosensibles como el licopeno y el ácido ascórbico; y el empleo de altas temperaturas durante el secado ocasiona pérdidas de estos nutrientes (Candelas et al., 2005). Los carotenoides, en especial el licopeno, han cobrado gran importancia debido a que son antioxidantes que neutralizan los radicales libres que dañan a las células. La degradación del licopeno afecta el atractivo color de los productos finales, además de su valor nutritivo. El alto grado de insaturación de los carotenoides los hace susceptibles a la oxidación, siendo especialmente sensibles a la luz, calor (temperaturas elevadas) y oxígeno.

Durante el procesamiento industrial de tomate se genera un subproducto conocido como tomasa, el cual representa al menos el 4% del peso de la fruta y corresponde a la cáscara (piel) y semillas (Reyes, 2021). De acuerdo con Palomo et al., (2019) la tomasa de tomate fresca está constituida por piel y pulpa (78%) y semillas trituradas (22%); siendo una buena fuente de carotenoides.

El uso de altas temperaturas de deshidratación causa efectos adversos en cuanto a la apariencia del tomate, reduciendo el contenido de nutrientes e induciendo un sabor dulce a consecuencia de la caramelización de los azúcares. En general, la disminución de la temperatura de deshidratación alargará el tiempo de proceso, pero el tomate obtenido tendrá mejores atributos nutricionales, color, aroma, sabor y textura (Ochoa-Reyes et al., 2013).

El secado asistido por bomba de calor es una alternativa especial de deshidratación por convección que opera a bajas temperaturas. El SBC combina dos sistemas termodinámicos, el secador y la bomba de calor. Este incorpora la cámara de secado con los elementos del circuito frigorífico (bomba de calor), el cual está constituido por una unidad condensadora, una unidad evaporadora, un compresor tipo reciprocante para refrigerante y una válvula de expansión (Gómez-Daza, 2023). La principal utilidad de este sistema aplicado al secado surge de la capacidad de controlar de forma independiente la temperatura del aire de secado y la humedad. En especial, existe una configuración “única” del SBC enfocado en el control de la humedad relativa y no por control de temperatura o temperatura y humedad relativa simultáneamente, como se realiza en general (Gómez-Daza, 2023).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto del SBC sobre la preservación del licopeno en la cáscara de tomate, buscando aportar a la valorización de subproductos agroindustriales mediante el uso de métodos de secado eficientes y adaptadas a compuestos termosensibles como el licopeno.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del tomate.

2.1.1. Importancia.

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una planta perenne anual de porte arbustivo la cual se desarrolla de forma rastrera semierecta. La especie tiene origen en la parte noroccidental de Suramérica y en el imperio Azteca, en ambos lugares hubo un proceso de domesticación. China se encuentra en el primer lugar de los principales países productores con aproximadamente 162 millones de toneladas por año y Estados Unidos es el principal país importador con 1,953,479 toneladas al año. De acuerdo con los datos oficiales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en el año 2023 se acopiaron 325,394 toneladas de tomate en las principales centrales mayoristas de Colombia. Durante el quinquenio 2019-2023, la oferta de tomate en los mercados mayoristas Colombianos aumentó de 283,502 toneladas en 2019 a 325,394 toneladas en 2023, reflejando una tendencia al alza (DANE, 2024). El tomate es uno de los productos agrícolas más importantes en la dieta humana por ser fuente de una gran cantidad de nutrientes como licopeno, β -caroteno, fitoeno, fitoflueno y luteína. Aunque frecuentemente se consumen frescos, cerca del 80% de los tomates se destinan para ser consumidos como productos procesados como jugo de tomate, pasta, ketchup y salsa. El tomate y sus productos derivados son los principales contribuyentes de carotenoides en la dieta humana, principalmente de licopeno (Tigcilema, 2020).

Los tomates son altamente perecederos en estado fresco debido a su alto contenido de humedad (>90%) que conduce a la pérdida de calidad durante el procesamiento y almacenamiento. Tales deficiencias pueden reducirse mediante la transformación del tomate en otros productos que conlleven a la reducción del costo de empaques, manejo y transporte junto con una mayor vida útil. Por otra parte, las cáscaras de tomate encuentran usos de bajo valor añadido como alimentos para animales, fertilizantes o se envían directamente a vertederos. Sin embargo, siguen siendo ricas en nutrientes importantes como proteínas, lípidos, carbohidratos, fibras y constituyen una fuente primaria de varios carotenoides, en especial el licopeno (Pataro et al., 2018).

2.1.2. Características.

Los carotenoides son pigmentos naturales que proporcionan colores amarillos, naranjas y rojos en frutas y verduras. Destacan por ser precursores de vitamina A y por su alta capacidad antioxidante, debido a la presencia de dobles enlaces conjugados. El tomate se considera una fuente alta de vitamina C y vitamina A, B y E en menor proporción. El contenido de vitamina C disminuye a medida que el fruto madura, mientras la vitamina A está presente en forma de carotenoides (precursores) y la vitamina E está presente como tocoferoles alfa y beta (Tigcilema, 2020).

2.1.3. Tomasa.

De acuerdo con Del Valle et al., (2006) la tomasa deshidratada contiene 9% de fibra neta disponible (FND), 25.7% de azúcares totales y 19.3% de proteína. La tomasa de tomate deshidratado presenta un alto contenido de compuestos antioxidantes, siendo principalmente carotenoides (aprox. 950 mg/kg), destacando el licopeno, β -caroteno y compuestos fenólicos (Reyes, 2021). El licopeno y β -caroteno se encuentran en mayor proporción en la cáscara del tomate, especialmente en el pericarpio, ubicándose principalmente en los cromoplastos (Popescu, et al., 2023). De esta manera, la cáscara es la principal responsable de la concentración de carotenoides en el tomate. En particular, se acumula en la cáscara en concentraciones hasta cinco veces superiores a las de las semillas y la pulpa de tomate (Pataro et al., 2018).

2.2. Indicadores de calidad del tomate deshidratado.

Cambios en parámetros como el color, contenido de ácido ascórbico, licopeno, fenoles totales y actividad de agua durante el procesamiento térmico del tomate y sus subproductos funcionan como indicadores de calidad del producto deshidratado, influyendo directamente en su valor nutritivo y comercial (Tigcilema, 2020).

2.2.1. Licopeno.

El licopeno es el caroteno más sencillo dentro del grupo de los carotenoides, ya que se caracteriza por su estructura lineal y acíclica conformada por 11 enlaces dobles conjugados, que se alternan a lo largo de una cadena hidrocarbonada (Figura 1), la cual es responsable de su color rojo intenso y permite una alta capacidad de absorción en la región visible del espectro electromagnético. A diferencia de otros carotenos que presentan ciclación en sus extremos, el licopeno mantiene una estructura lineal, lo cual reduce las fuerzas estéricas y permite una mayor deslocalización

electrónica a lo largo de su cadena, permitiendo que se puedan estudiar las propiedades ópticas y la reactividad de los carotenoides (Rodríguez-Amaya, 1999).

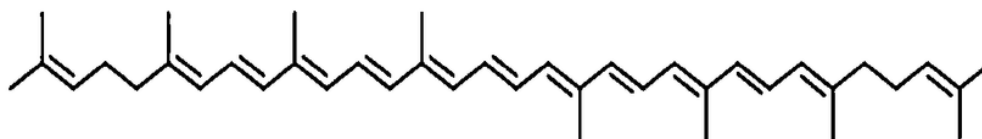


Figura 1. Estructura química del licopeno (Rodríguez-Amaya, 1999).

El espectro de absorción UV-Vis del licopeno presenta tres picos característicos de absorción en longitudes de onda de 444, 471 y 502 nm, correspondientes a transiciones electrónicas dentro de su sistema conjugado. Estos tres picos son típicos en carotenoides altamente insaturados y su presencia indica una alta conjugación de la molécula. Cuanto mayor sea la cantidad de dobles enlaces, mayor es la longitud de onda a la que el carotenoide puede absorber la luz, lo que se traduce en colores rojos más intensos. En el caso del licopeno, esta propiedad explica su tonalidad roja intensa, lo cual lo convierte en un pigmento importante en frutos como el tomate (Rodríguez-Amaya, 1999).

El licopeno es un carotenoide sin actividad de provitamina A, que puede brindar protección contra daños causados por especies reactivas del oxígeno (radicales libres), presentando un efecto biológico en la reducción del colesterol y además siendo el compuesto bioactivo liposoluble más importante presente en el tomate maduro (So et al., 2020). El licopeno constituye aproximadamente el 83% de todos los pigmentos presentes en el tomate, siendo el fruto que tiene la proporción más alta de dicho compuesto. Los tomates y productos de tomate tienen una concentración de licopeno de 3.1-8.6 mg por cada gramo (An et al., 2019). El licopeno tiene una capacidad de enfriamiento de oxígeno dos veces mayor que la del β -caroteno, funcionando como un antioxidante muy potente al momento de neutralizar especies reactivas del oxígeno (Skiepko et al., 2016). Además, reduce los niveles de colesterol LDL (“colesterol malo”), de acuerdo con Ried & Fakler, (2011) en un metaanálisis de subgrupos con cuatro ensayos clínicos utilizando dosis altas de licopeno (>25mg), se observó una disminución significativa del colesterol LDL, con una media de reducción de 10.35 mg/dL (IC 95%: -15.99 a -4.71; $p = 0.0003$). También, el licopeno ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares, de próstata, cervicales, tiene una alta capacidad

antiinflamatoria, antiplaquetaria y propiedades antihipertensivas (Skiepkó et al., 2016). En la Tabla 1 se puede observar el contenido de licopeno en diversos productos alimenticios.

Tabla 1. Contenido de licopeno en diversos productos alimenticios.

Producto	Contenido de licopeno (mg/100g)
Kétchup	1.9-26.2
Zumo de tomate	7.1
Salsa de tomate	26.1
Puré de tomate	27.3
Pulpa de tomate	28.6
Calabaza	3.8-4.6
Pomelo	3.3
Zanahoria	0.7-0.7
Albaricoque	0.1
Papaya	0.1-0.5
Guayaba	0.8-1.8
Sandia	2.3-7.2

Fuente: Gámez, (2017)

De acuerdo con la base de datos acerca de la composición de los alimentos del USDA, la cantidad de licopeno es de aproximadamente 2.57 mg por 100 g en tomate y 15 mg por 100 g en salsa de tomate; por ende, para alcanzar la dosis diaria equivalente (8.1 mg de licopeno), es necesario consumir tres tomates medianos (375 g) o $\frac{1}{4}$ de taza de salsa de tomate (245 g) por día (Xia et al., 2018).

Al igual que el resto de los carotenoides, el licopeno es un compuesto muy sensible a la degradación e isomerización. De hecho, el licopeno es muy estable cuando se encuentra en el fruto,

pero muy lábil al momento de la extracción, viéndose acelerada su oxidación con el aumento de la temperatura y la presencia de metales, cuya degradación sigue una cinética de primer orden (Gámez, 2017). Lee & Chen, (2002) demostraron que a 50 °C comienza la isomerización y a 100-150 °C la degradación era prácticamente total. El efecto es contrario cuando la temperatura se encuentra por debajo de 0 °C; en tal caso, cuanto menor sea la temperatura, mejor será la conservación del licopeno. El contenido de agua también influye en la estabilidad del licopeno y así, la pérdida de licopeno es menor en tomates desecados (Martínez-Hernández et al., 2016). Por lo tanto, las condiciones óptimas de almacenamiento para reducir la pérdida de licopeno son: en oscuridad, a vacío, en temperaturas de congelación y con un bajo contenido de humedad (Gámez, 2017).

2.2.2. Color.

El espacio de color CIELAB, es actualmente uno de los espacios de color más uniformes usado para evaluar el color en el área de alimentos. Este es un sistema cartesiano formado por tres ejes, un eje vertical (L^*) que representa la medida de la luminosidad de un color que varía desde cero para un negro hasta 100 para un blanco, un eje horizontal (a^*) que representa la medida del contenido de rojo (a^* positivo) o de verde (a^* negativo) de un color; y otro eje horizontal (b^*) perpendicular al eje (a^*), el cual representa una medida del contenido de amarillo (b^* positivo) o de azul (b^* negativo) de un color (Oliag-Talens, 2017).

El color de un alimento debe describirse con base en los tres atributos de color: luminosidad (L^*), tonalidad (h^*) y pureza de color (C^*). La luminosidad es una propiedad visual según la cual una superficie emite luz en mayor o menor medida. El tono se encuentra determinado por el valor exacto de la longitud de onda de la luz reflejada (rojo, naranja, amarillo, verde, azul y púrpura), y la pureza (saturación) es el atributo según el cual una superficie parece mostrar más o menos tonalidad (contenido de color) (Oliag-Talens, 2017).

En el espacio de color CIELAB, la luminosidad se representa por el eje vertical L^* , la tonalidad h^* por el contorno de la esfera y la pureza C^* por el radio desde el centro al exterior de la esfera, como se muestra en la Figura 2.

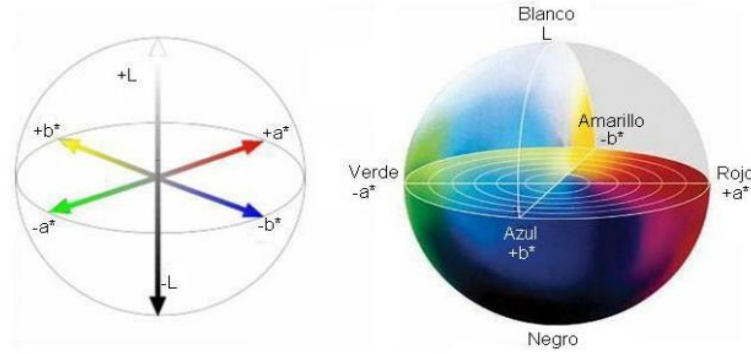


Figura 2. Espacio de color CIELAB (Gómez, 2009).

Estos atributos de color pueden obtenerse a partir de los valores de L^* , a^* y b^* , representados en las Ecuaciones (1) a (3).

$$Luminosidad = L^* \quad (1)$$

$$Tonalidad = h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

$$Pureza = C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

El color en el tomate es una característica importante para la determinación de la madurez, la predicción de la vida post cosecha y la aceptación del consumidor. El color se debe principalmente a la presencia de carotenoides, con el licopeno como el más abundante, mientras que el sabor proviene de los azúcares y compuestos volátiles. En el caso de los tomates deshidratados, su color cambia con el tiempo debido a la oxidación de los carotenoides, oscurecimiento no enzimático, reacciones de Maillard y la degradación del licopeno. Generalmente, incrementos en el tiempo de secado y de la temperatura provocan un incremento en la luminosidad (L^*) y una disminución en el color rojo (a^*/b^*) después del secado con aire. Finalmente, el incremento del valor de a^* está asociado directamente con el contenido de licopeno (Gómez, 2009).

2.3. Métodos de secado para la deshidratación del tomate.

2.3.1. Secado de alimentos.

El secado se define como una operación unitaria en la que ocurre un transporte simultáneo de calor y masa. Las condiciones externas de temperatura, flujo, humedad del aire, área superficial y presión influyen directamente en la eliminación de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido; mientras que el movimiento del agua a través del sólido hacia la superficie depende de su composición física, temperatura y porcentaje de humedad. La transferencia de energía puede ocurrir por conducción, convección, radiación o por combinación de estos mecanismos (Padilla-Frías, 2018).

El secado permite preservar alimentos altamente perecederos, especialmente frutas y hortalizas cuyo contenido de agua es típicamente superior al 90%. El objetivo principal de esta tecnología es reducir el contenido de humedad de los alimentos y, por ende, su actividad enzimática y la capacidad de reproducción de los microorganismos (Ochoa-Reyes et al., 2013). La operación de secado implica una serie de cambios físicos, químicos y organolépticos en el alimento, tales como encogimiento, cristalización, despolimerización, variación de color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento (Padilla-Frías, 2018).

Las principales variables que condicionan la eliminación de agua en un alimento son el tiempo y la temperatura, sin embargo, el incremento de la superficie de contacto del alimento con el aire incrementará la velocidad de movimiento del agua hacia el exterior. En general, la disminución de la temperatura de deshidratación alargará el tiempo del proceso, pero el producto obtenido tendrá mejoras atributos nutricionales y organolépticos (color, sabor, aroma y textura), en contraste con el uso de altas temperaturas que aceleran el proceso de secado, pero reducen el contenido de nutrientes (Ochoa-Reyes et al., 2013).

2.3.2. Secado asistido por bomba de calor (SBC).

El método de SBC se ha adoptado de manera amplia en el proceso de deshidratación de frutas, vegetales y materiales biológicos. Esto se debe a que, de acuerdo con investigaciones iniciales, ha demostrado mejorar las propiedades de color y aroma de los productos en comparación con el uso

de secadores convencionales de aire caliente convectivo. Este enfoque permite mantener la calidad de los productos deshidratados al emplear temperaturas moderadas y controlar cuidadosamente los niveles de humedad del aire (Muñoz-Botina & Vivas-Ruiz, 2015).

El sistema SBC consta de dos componentes principales: un sistema de bomba de calor y una cámara de secado. La cámara de secado puede adoptar diferentes formas, como transportador de bandeja, lecho fluido o banda. Los elementos principales de un sistema SBC incluyen una unidad evaporadora, una unidad condensadora, un compresor y una válvula de expansión, como se muestra en la Figura 3 (Colak & Hepbasli, 2009).

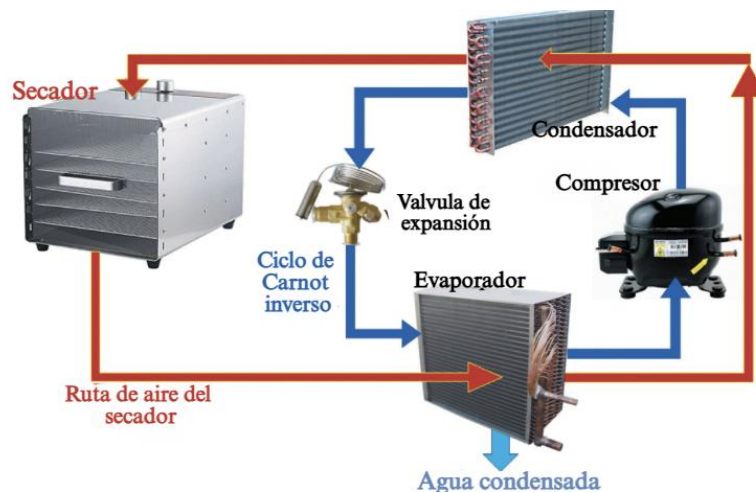


Figura 3. Esquema del secador asistido por bomba de calor (Salehi, 2021).

El secador asistido por bomba de calor opera mediante dos circuitos independientes: uno de aire cerrado destinado al secado de alimentos y otro de refrigerante cerrado que regula la temperatura del aire utilizado en el proceso. El fluido de trabajo, que es un refrigerante, se vaporiza a baja presión en el evaporador al absorber calor del aire caliente que sale del secador. El compresor aumenta la energía del refrigerante y lo libera como vapor sobrecalentado a alta presión. El calor se extrae del fluido de trabajo y se devuelve al aire del proceso en el condensador. El sistema permite que el aire que se calienta en su paso por el condensador pase a través de la cámara de secado. Luego el fluido de trabajo proveniente del condensador se reduce a baja presión mediante una válvula de expansión y regresa al evaporador para completar el ciclo. El aire húmedo que sale del secador pasa por el evaporador, donde la humedad se condensa si la temperatura del aire desciende por debajo del punto de rocío (Colak & Hepbasli, 2009).

El SBC representa un enfoque alternativo en el proceso de secado, debido a que ofrece la posibilidad de mejorar la eficiencia energética y controlar los parámetros de operación. Esto es relevante debido a que el secado es una de las operaciones unitarias que más consume energía en la producción industrial, llegando a representar hasta un 15% del total del consumo energético (Muñoz-Botina & Vivas-Ruiz, 2015). Por lo tanto, la gestión energética se convierte en una variable esencial en el proceso de secado, ya que la eficiente conservación de la energía contribuye a reducir los costos operativos generales (Colak & Hepbasli, 2009).

A través del sistema SBC, es posible controlar parámetros como la humedad relativa (HR), la temperatura y la velocidad del aire. La evolución de este sistema se beneficia al reducir el consumo de combustibles fósiles y la cantidad de energía requerida. El producto resultante puede conservarse durante un periodo de hasta seis meses. Mediante los análisis de datos, se han identificado las condiciones óptimas del proceso de secado de productos agrícolas, entre los que se encuentra el tomate y sus subproductos, que incluyen temperaturas de 60 °C y HR entre el 11.9% y el 13.31%. De acuerdo con Muñoz-Botina y Vivas-Ruiz (2015), en su investigación sobre la arracacha, estas condiciones garantizan la obtención de un producto deshidratado de alta calidad, entendida como aquella que preserva sus características sensoriales y nutricionales.

3. ANTECEDENTES

Las Tablas 2 y 3 presentan los antecedentes más recientes en cuanto a la extracción de licopeno del tomate y la implementación del secado asistido por bomba de calor para la deshidratación de productos agrícolas, respectivamente.

Tabla 2. Antecedentes acerca de la extracción de licopeno del tomate.

Tipo de extracción	Reactivos o solventes	Material	Condiciones	Cantidad de licopeno	Autor
Asistida por ultrasonido (EAU)	Acetato de etilo	Residuos de tomate procesados	30% de acetato de etilo en solución	1.3348 mg/g	Silva et al. (2018)

			(v/v), relación de disolvente 100 ml/g, en 63.4°C durante 20 min		
Campo eléctrico de pulso (PEF)	Blanqueami ento con vapor (SB)	Cáscara de tomate	0.5 kV/cm, 1 kJ/kg y la aplicación de SB por 1 min a 60°C	0.379 mg/g	Pataro et al. (2018)
Fluidos supercríticos	Etanol	Piel de tomate	59°C, 350 bar y 15% (v/V) de etanol por 30 min	0.45 mg/g	de Andrade Lima et al. (2019)
Fluidos supercríticos	Etanol	Pulpa de tomate		0.46mg/g	de Andrade Lima et al. (2019)

Altas presiones	Etanol/acetona y hexano	Pulpa de tomate	60% de hexano en mezcla de solventes (etanol-acetona) a 450 MPa por 10 min	0.0201 mg/g	Briones-Labarca et al. (2019)
Campo eléctrico de pulso (PEF)		Residuos de tomate industrial maduro	1.0 kV/cm para 7.5 ms (extracción de licopeno)	0.1432 mg/g	Andreou et al. (2020)
Fluidos supercríticos	Dióxido de carbono CO ₂	Tomate seco	450 bar, 65-70°C, 18-20 kg/h Caudal másico de CO ₂ , aprox. 1 mm de tamaño medio del material y 10% p/p de disolvente (aceite de avellana)	0.03 mg/g	Margotta & De Simone (2020)

Tabla 3. Investigación acerca de la utilización del secado asistido por bomba de calor en productos agrícolas.

Fruta o vegetal	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura de secado (°C)	Humedad relativa (%)	Principales resultados	Autor
Uva	1.5, 2.0 y 2.5	45	-	El aumento de la velocidad del aire de 1.5 a 2.5 m/s en el HPD provocó una reducción en el tiempo de secado en un 69% Se observó que parte de las propiedades bioactivas se perdían en las muestras, pero hubo menos pérdidas en todas las propiedades a 2 m/s	Taşeri et al. (2018)
Kiwi	1	45, 55 y 65	-	El HPD y la recirculación de aire aumentan la velocidad de secado de las rodajas de Kiwi	Mohammadi et al. (2019)

Cerezas de café arábica	0.6	40-50	70	Resultados combinados de análisis sensoriales y químicos mostraron que el HPD fue superior a TD en cuanto a preservar la calidad general del sabor	Kulapichitr et al. (2019)
Banana	0.8	62-67	-	El coeficiente de rendimiento (COP) es más alto para la HPD simple en comparación con IAHPD, SAHPD, SIAHPD La temperatura de secado óptima para obtener el mejor color y calidad de los chips de banano secos se encuentra en el rango de 60-70°C	Singh et al. (2020)
Azufaifa	2	55, 60 y 65	-	Alto ahorro energético (21,5%)	Hou et al. (2020)

				Mejoró la calidad de la apariencia con un creciente valor de L^* y valor ΔE decreciente	
				La energía desprendida al ambiente por parte del HPD es significativamente menor al MVD	
Tomate	1	40-42	15	El análisis se centró en la eficiencia energética del HPD y no en la influencia del secado en las propiedades del tomate	Kumar et al. (2022)
Arroz	-	62.9	16.1	El secado dio como resultado productos de mayor calidad debido a un mayor rendimiento de arroz de cabeza, un menos arroz partido y una	Yahya et al. (2023)

				menor lechada de arroz	
				El rendimiento de secado de cuartos de tomate en HPD fue 30% mejor en	Karabacak &
Tomate	2	-	-	comparación con el SAHPD y se obtuvo la velocidad de secado más alta (0.237 kg/h)	Atalay, (2010)

Fuente: elaboración propia.

Nota:

HPD: Heat Pump Dryer (Secador asistido por bomba de calor)

TD: Tray Dryer (Secador de bandejas)

COP: Coefficient of performance (Coeficiente de rendimiento)

IAHPD: Infrared-assisted Heat Pump Dryer

SAHPD: Solar-assisted Heat Pump Dryer

SIAHPD: Solar-Infrared-assisted Heat Pump Dryer

MVD: Microwave Dryer (Secador de microondas).

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las industrias alimenticias se encuentran en la búsqueda de hacer de sus productos más naturales, aumentando sus propiedades nutricionales, en favor del bienestar del consumidor, los cuales cada vez más exigen un alto nivel de información sobre la trazabilidad de los procesos. Es así como la adición de proteínas, fibras, vitaminas, entre otros compuestos extraídos de frutas y vegetales, pueden mejorar la calidad del producto (Tigcilema et al., 2020).

El tomate y los alimentos a base de tomate presentan un bajo nivel calórico, son libres de grasa y colesterol, y representan una fuente de compuestos bioactivos que benefician la salud, reduciendo el riesgo de sufrir enfermedades como el cáncer, osteoporosis y enfermedades cardiovasculares. Se cree que compuestos como el licopeno son responsables de actuar como agentes anticancerígenos. Mediante estudios epidemiológicos se ha demostrado los beneficios de los carotenoides para la salud y en especial el licopeno, el cual es el carotenoide más importante para la nutrición humana y, a su vez, el más abundante en el tomate y sus productos derivados, especialmente en la cáscara, al ser el responsable del color rojo característico de estos. Además, la cáscara de tomate también contiene antocianinas, ácido ascórbico y compuestos fenólicos, que tienen una alta actividad antioxidante (Tigcilema et al., 2020).

Ante la búsqueda de optimizar los procesos industriales de secado de productos agrícolas para no deteriorar atributos de calidad (color, aroma, textura y propiedades nutricionales), se han presentado nuevas alternativas de procesos en los cuales se reduzca el consumo de combustibles fósiles y se aumente la eficiencia energética. De esta manera, surge la alternativa del secado asistido por bomba de calor (SBC), técnica en la cual se pueden controlar los parámetros de operación del secado, tales como la velocidad de flujo de aire, la humedad relativa y la temperatura (Muñoz-Botina & Vivas-Ruiz, 2015).

El tomate es un fruto altamente susceptible al empleo de altas temperaturas de secado, ocasionando pérdidas de componentes termosensibles y características organolépticas durante el procesamiento (Candelas et al., 2005). Por esta razón, se busca explorar nuevas alternativas de secado que reduzcan la pérdida de calidad del alimento deshidratado, en este caso, mediante la cuantificación del contenido de licopeno en la cáscara de tomate deshidratada.

5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Por ende, surge la pregunta de investigación: ¿Cuál es la influencia del secado asistido por bomba de calor en la concentración de licopeno en la cáscara de tomate?

6. JUSTIFICACIÓN

La deshidratación de tomate se puede realizar mediante distintas técnicas de secado, como secado al sol, secado por aspersión, secado convectivo en túnel, secado en charolas giratorias, entre otros. No obstante, los métodos mencionados anteriormente proporcionan algunas desventajas. El secado al sol presenta inconvenientes al momento de controlar las variables del proceso debido a las condiciones ambientales cambiantes. En el secado por aspersión se ha observado la dificultad de secar el tomate debido a la alta cantidad de azúcares presentes en la fruta, que se pueden caramelizar; además de la concentración de coadyuvantes como la maltodextrina que afectan el color del polvo rehidratado. En el secado convectivo en túnel se obtienen deshidratados no uniformes debido a la longitud del secador y a la no recirculación del aire (Gómez, 2009).

Las grandes cantidades de desechos industriales en la producción de derivados del tomate combinadas con las potenciales características benéficas presentes en la cáscara de tomate justifican el creciente interés de investigadores y empresas en la extracción de compuestos antioxidantes, principalmente licopeno. Además, el aprovechamiento de dicho subproducto puede generar un ingreso extra para las empresas del sector (Gómez, 2009).

Puesto que el licopeno es responsable del color rojo de los tomates y, a su vez, el color es usado como indicador de calidad de productos del tomate, resulta de principal interés disminuir las pérdidas de licopeno a través del proceso de secado y durante el almacenamiento. Se considera que temperaturas de secado inferiores a 65 °C permiten preservar el color y sabor del tomate, así como los compuestos, tales como polifenoles, flavonoides, licopeno, β -caroteno y ácido ascórbico, los cuales brindan al fruto una alta actividad antioxidante y un efecto contra varias formas de cáncer y enfermedades cardiovasculares (Ochoa-Reyes et al., 2013). Por este motivo, surge la alternativa del secado asistido por bomba de calor (SBC), en el cual se ha demostrado la obtención de frutas secas con mejor calidad en comparación con otros métodos de secado; minimizando el daño por calor, los cambios de color del producto seco y la retención de pigmentos volátiles (Guevara & López, 2013).

7. HIPÓTESIS

Hipótesis nula (H_0): el secado asistido por bomba de calor no contribuye significativamente a la reducción de la degradación del licopeno en la cáscara de tomate deshidratada.

Hipótesis alterna (H_1): el secado asistido por bomba de calor contribuye significativamente a la reducción de la degradación del licopeno en la cáscara de tomate deshidratada.

8. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto del secado asistido por bomba de calor en la preservación del contenido de licopeno en la cáscara de tomate deshidratada.

8.1. Objetivos específicos.

- Evaluar la influencia de las variables de proceso en los indicadores de desempeño energético durante el proceso de secado de cáscara de tomate.
- Identificar las condiciones de humedad relativa (%) y velocidad del aire (m/s) en el SBC para obtener la mayor concentración de licopeno en el secado de cáscara de tomate.
- Ponderar los resultados obtenidos en cuanto a la concentración de licopeno con lo existente en la literatura respecto a la cáscara fresca y deshidratada.

9. METODOLOGÍA

La Figura 4 muestra los pasos a seguir para la cuantificación de la concentración de licopeno en la cáscara de tomate deshidratada.

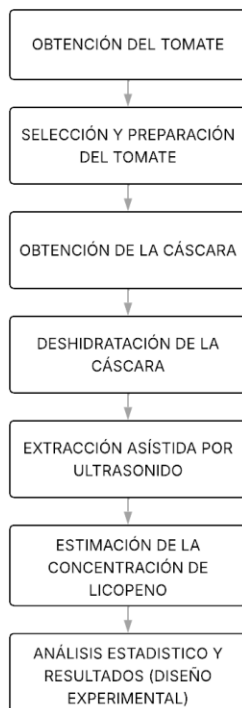


Figura 4. Diagrama general del proceso.

9.1. Obtención del tomate.

Para el desarrollo del proyecto se tuvieron en cuenta tomates de variedad chonto, comprados en los Supermercados Éxito, los cuales son obtenidos de los cultivos ubicados en el norte del departamento del Valle del Cauca.

9.2. Selección y preparación del tomate.

Los tomates seleccionados fueron aquellos que contaban con un color rojo uniforme en la superficie y que se encontraban sin magulladuras y con una masa total en el rango de 120-200 g. Se sometieron a un lavado manual con el fin de eliminar impurezas adheridas para posteriormente retirar la cáscara del tomate y eliminar manualmente las semillas con el fin de disminuir la variabilidad en la masa de la cáscara de tomate posterior al proceso de deshidratación.

9.3. Deshidratación de la cáscara de tomate.

9.3.1. Descripción del secador asistido por bomba de calor (SBC).

El secado asistido por bomba de calor (SBC) emplea un circuito frigorífico compuesto por una unidad condensadora de 2.9 kW, una evaporadora de 3.7 kW, un compresor de pistón tipo reciprocante de 0.2 kW (marca Tecumseh) que utiliza refrigerante R-22 y una válvula de expansión que reduce la presión de 220 psi a 30 psi (Gómez-Daza, 2023). A diferencia de los diseños convencionales, todos estos componentes están integrados dentro del circuito de aire. El sistema maneja un flujo de aire de $0.54 \text{ m}^3/\text{s}$ y cuenta con una cámara de secado equipada con cinco bandejas de $0.36 \text{ m} \times 0.36 \text{ m}$, dispuestas con una separación de 7.5 cm entre sí. El peso de las bandejas y de la muestra se mide con una balanza (marca Lexus, modelo Fénix) (Gómez-Daza, 2023).

El sistema está equipado con cinco puntos de medición de temperatura y humedad relativa. Cuenta con dos termohigrómetros análogos ubicados en el retorno del aire dentro de la cámara de secado y en la cabina, antes de que el flujo pase por el condensador. Además, incluye un termohigrómetro digital en la entrada de la cámara de secado, encargado de controlar el “set point” del sistema de refrigeración. Para monitorear las temperaturas de evaporación y refrigeración, se utilizan dos termómetros digitales. La humedad relativa es regulada por un controlador digital MT-530 (marca Full Gauge), que opera en un rango de 20 a 85% HR con una precisión de 0.1% HR. También se emplean termocuplas adicionales para registrar la temperatura tanto de la cámara como de la muestra, en su parte central y superficial. Finalmente, el agua eliminada del producto durante el proceso se recoge en un recolector de condensado situado en la parte inferior del equipo (Gómez-Daza, 2023). En la Figura 5 se puede observar una fotografía del equipo descrito anteriormente.



Figura 5. Fotografía del sistema del secador asistido por bomba de calor SBC (Gómez-Daza, 2023).

9.3.2. Cálculo del contenido de humedad inicial de las muestras de cáscara de tomate.

Por gravimetría se determinó el contenido de humedad inicial de las muestras sometidas a cada proceso de secado por triplicado. El proceso se realizó por 24 horas en una estufa a 105 °C.

9.3.3. Proceso de secado de la cáscara de tomate.

Para realizar el secado de las muestras a través del sistema de secado asistido por bomba de calor (SBC) se tuvo en cuenta dos principales factores como lo son la humedad relativa del aire (%) y la velocidad del aire (m/s), cada una con sus respectivos niveles; en busca de identificar el efecto de la interacción de los diferentes factores en las variables de respuesta. En este caso las variables de respuesta hacen referencia a los indicadores de desempeño energético (DR, SEC y SMER), los parámetros de color (L^* , a^* , b^* , C^* , h^* y E) y la concentración de licopeno (mg/100g). Para esto las muestras de cáscara de tomate fueron dispuestas sobre las bandejas (0.36 m x 0.36 m) ubicadas en el secador asistido por bomba de calor (SBC), como se puede observar en la Figura 6, bajo condiciones de operación específicas, humedad relativa 10, 20, 30% y velocidad del aire 0.5, 1, 1.5 m/s; obteniendo así un total de nueve tratamientos de secado.

Para cada tratamiento, el tiempo de secado fue determinado como el tiempo que requirió la muestra para llegar a un contenido de humedad inferior al 10% (b.h) (H_f) teniendo en cuenta el peso promedio de esta (P_s), como se muestra en las Ecuaciones (4) y (5). Además, se calculó el consumo

específico de energía (SEC), la velocidad específica de extracción de humedad (SMER) y la velocidad de secado (DR), los cuales funcionan como indicadores de desempeño energético para el secado, tal como se muestra en las Ecuaciones (6) a (8).

$$P_s = - \left(\left(\frac{H_0 * m_0}{100} \right) - m_0 \right) \quad (4)$$

$$H_F = \left(\frac{m_f - P_s}{m_f} \right) * 100 \quad (5)$$

Donde:

P_s : Peso promedio (constante) de la muestra deshidratada (kg)

H_0 : Humedad inicial de la muestra (%) (b.h) calculada por método gravimétrico

m_0 : Masa inicial de la muestra (kg)

H_F : Humedad final de la muestra (kg) < 10% (b.h)

m_f : Masa final de la muestra (kg)

$$SEC \left[\frac{kWh}{kg} \right] = \frac{A_s * W_{aire} * \rho_{aire} * C_{p\ aire} (T - T_{amb})}{m_0} * t \quad (6)$$

$$SMER \left[\frac{kg}{kWh} \right] = \frac{Cantidad\ de\ agua\ evaporada}{Energía\ de\ entrada\ al\ secador} = \frac{1}{SEC} \quad (7)$$

$$DR \left[\frac{kg\ agua}{h} \right] = \frac{Agua\ evaporada}{Tiempo\ de\ secado} = \frac{m_0 - m_f}{t} \quad (8)$$

Donde:

A_s : Área superficial de la muestra (bandeja) (m²)

W_{aire} : Velocidad del aire (m/s)

ρ_{aire} : Densidad del aire a la temperatura de proceso (kg/m³)

Cp_{aire} : Calor específico del aire a la temperatura de proceso (kJ/kg °C)

T : Temperatura de proceso (°C)

T_{amb} : Temperatura ambiente de la ciudad de Cali (Aprox. 25 °C)

m_0 : masa inicial de la muestra (kg)

m_f : Masa final de la muestra (kg)

t : Tiempo de secado (h)



Figura 6. Cáscara de tomate dispuesta en las bandejas del secador asistido por bomba de calor SBC.

9.4. Medición de color.

Se seleccionaron muestras por triplicado antes y después de cada tratamiento de secado para tener un ponderado al momento de determinar los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* , h^* y E ; y así, determinar las alteraciones en el color después de que el producto haya pasado por el proceso de secado. La determinación de los parámetros L^* , a^* y b^* se realizó dentro del espacio CIELAB con un colorímetro calibrado con una placa blanca ($L^*=96.94$, $a^*=0.16$, $b^*=2.02$) y una rosa ($L^*=44.88$, $a^*=25.99$, $b^*=6.67$), utilizando un iluminante D65. Por su parte, la determinación de los parámetros h^* , C^* y ΔE (representativos del espacio CIELCh) se realizó utilizando las Ecuaciones (9) a (11), su respectivo cambio respecto al valor inicial mediante las Ecuaciones (12) y (13) y el cambio porcentual con las Ecuaciones (14) y (15).

$$h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (9)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (10)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (11)$$

$$\Delta h^* = h_f^* - h_0^* \quad (12)$$

$$\Delta C^* = C_f^* - C_0^* \quad (13)$$

$$\Delta h^*(\%) = \frac{h_f^* - h_0^*}{h_f^*} * 100 \quad (14)$$

$$\Delta C^*(\%) = \frac{C_f^* - C_0^*}{C_f^*} * 100 \quad (15)$$

9.5. Extracción y cuantificación del licopeno.

9.5.1. Extracción con solventes orgánicos asistida por ultrasonido.

Siguiendo la metodología establecida por Abdul-Hammed et al., (2013) para la extracción convencional de carotenoides por solventes orgánicos, al obtener las muestras de cáscara de tomate deshidratadas se realizó la molienda para obtener un producto en polvo (Figura 7a), al cual se le realizó la extracción por triplicado (Figura 7c). La extracción de licopeno (carotenoides) de las muestras de cáscara de tomate se realizó a partir de 1 g de muestra en polvo, con hexano: acetona (1:1) durante 60 minutos, utilizando una relación muestra: solvente de (1:4), en un agitador magnético de baño a temperatura ambiente (Figura 7b). A continuación, se recogió la fracción de disolvente con una pipeta almacenándose en un matraz en oscuridad y en refrigeración ($<5^{\circ}\text{C}$). Se volvió a añadir a las muestras la misma cantidad de hexano: acetona repitiendo la extracción en intervalos de 15 min, centrifugando las fracciones a 5000 rpm por 5 min, hasta que la absorbancia del disolvente orgánico observada en el espectrofotómetro Jasco V-730 (utilizando hexano como blanco) se comportó asintóticamente. Finalmente se realizaron diluciones de 1/25 y 1/10 de los extractos de carotenoides en hexano para facilitar su medición.

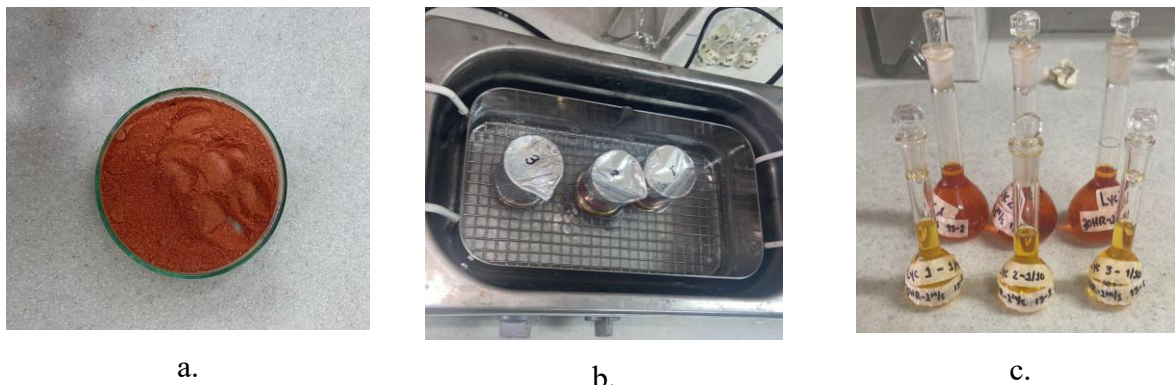


Figura 7. Extracción de licopeno. a) Obtención del polvo de cáscara de tomate deshidratada, b) Ultrasonido de muestras en solventes y c) Dilución de extractos de carotenoides para espectrofotometría.

9.5.2. Cuantificación del licopeno por método espectrofotométrico.

Se utilizó el espectrofotómetro Jasco V-730 a una longitud de onda de 502 nm. Los carotenoides se disolvieron en un volumen conocido de hexano, no sin antes trazar la línea base (cero) colocando hexano en las dos cubetas de cuarzo de 1 cm de paso de luz y posteriormente obteniendo el espectro de absorción de la muestra en un rango de 350 a 600 nm. Las máximas absorbancias fueron observadas a 450, 472 y 502 nm, para el extracto de carotenos en hexano. Como lo indica Abdul-Hammed et al., (2013) el licopeno en disolución obedece la ley de Beer-Lambert, la absorbancia a 450 nm y 502 nm (en una cubeta de cuarzo de 1 cm de paso de luz) de la mezcla de carotenoides de licopeno y β -caroteno se puede expresar siguiendo las Ecuaciones (16) y (17).

$$A_{450} = \epsilon_{licopeno}^{450} [Licopeno] + \epsilon_{\beta-caroteno}^{450} [\beta - caroteno] \quad (16)$$

$$A_{502} = \epsilon_{licopeno}^{502} [Licopeno] + \epsilon_{\beta-caroteno}^{502} [\beta - caroteno] \quad (17)$$

Donde:

A_{450} y A_{502} : Absorbancia (en una cubeta de cuarzo de 1 cm de paso de luz) de la mezcla de Licopeno/ β -caroteno en hexano a 450 nm y 502 nm, respectivamente.

$[Licopeno]$ y $[\beta - caroteno]$: Concentraciones molares de licopeno y β -caroteno, respectivamente.

$\varepsilon_{licopeno}^{450}$ y $\varepsilon_{\beta-caroteno}^{450}$: Absortividades molares de licopeno y β -caroteno a 450 nm.

$\varepsilon_{licopeno}^{502}$ y $\varepsilon_{\beta-caroteno}^{502}$: Absortividades molares de licopeno y β -caroteno a 502 nm.

Resolviendo la Ecuación (16), sustituyendo en (17) y conociendo los valores de las absortividades molares a 450 nm y 502 nm, se obtiene:

$$[\beta - caroteno] = \frac{1.483 * A_{450} - A_{502}}{1.798 * 10^5} \quad (18)$$

$$[Licopeno] = \frac{A_{450} - 1.39 * 10^5 [\beta - caroteno]}{1.16 * 10^5} \approx \frac{A_{502}}{1.72 * 10^5} \quad (19)$$

Finalmente, siguiendo la metodología planteada por Abdul-Hammed et al., (2013) se emplearon las Ecuaciones (18) y (19) para calcular las concentraciones de licopeno y β -caroteno en las muestras de cáscara de tomate sometidas a los distintos tratamientos de secado, asumiendo que las absorbancias a 450 nm y 502 nm son exclusivas para β -caroteno y licopeno, respectivamente.

9.6. Diseño experimental.

Para analizar el efecto de la humedad relativa (%) y la velocidad del aire de secado (m/s) y determinar si dichos factores presentaban una interacción que cause un efecto significativo sobre el contenido de licopeno de la cáscara de tomate, se planteó el siguiente diseño experimental factorial. El efecto de los factores sobre las variables de respuesta fue evaluado a humedades relativas de 10, 20 y 30 %; y velocidades del aire de 0.5, 1 y 1.5 m/s. De esta manera se obtuvo un modelo factorial 3^2 , con un total de 9 tratamientos de secado y realizando la cuantificación del contenido de licopeno y el cambio en los parámetros de color por triplicado para cada una de las muestras de cáscara de tomate deshidratada, contando así con un total de 27 unidades experimentales. El modelo estadístico se definió mediante la Ecuación (20).

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (20)$$

Donde:

Y_{ijk} : Valor aleatorio que toma la variable respuesta (L^* , a^* , b^* , C^* , h^* , E , y concentración de licopeno) en la k -ésima réplica que ha sido expuesta a la j -ésima velocidad del aire y a la i -ésima humedad relativa del aire.

μ : Parámetro de centralidad o efecto medio general

τ_i : Efecto debido a la i -ésima humedad relativa del aire (%)

γ_j : Efecto debido a la j -ésima velocidad del aire (m/s)

$(\tau\gamma)_{ij}$: Efecto debido a la interacción de primer orden entre los factores humedad relativa (%) y velocidad del aire de secado (m/s)

ε_{ijk} : Efecto debido al error experimental.

Para determinar si las variables independientes (factores) presentaron o no diferencias significativas en cuanto a la influencia sobre las variables de respuesta se utilizó un análisis ANOVA bajo un nivel de confianza del 95%, con el objetivo de determinar si los diferentes niveles de cada uno de los factores tienen una influencia conjunta en cada tratamiento ejecutado.

Los diseños experimentales planteados con anterioridad fueron evaluados a través de la hipótesis de interacción o la hipótesis de efectos principales, representados por las Ecuaciones (21) y (22), respectivamente; dependiendo si los factores analizados presentaron o no una interacción significativa en las variables de respuesta.

Hipótesis de interacción

$$H_o: (\tau\gamma)_{ij} = 0 \text{ para todo } i, j \quad (21)$$

$$H_1: (\tau\gamma)_{ij} \neq 0$$

Hipótesis de efectos principales

$$H_o: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para algún } i \quad (22)$$

$$H_o: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_b = 0$$

$$H_1: \gamma_j \neq 0 \text{ para algún } j$$

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1. Análisis estadístico.

De acuerdo con el diseño experimental factorial planteado para determinar la influencia del secado asistido por bomba de calor (SBC) en el contenido de licopeno de cáscaras de tomate deshidratadas, se ejecutaron los siguientes tratamientos, como se puede observar en la Tabla 4. Para comprobar si los diferentes niveles de las variables del proceso presentaban interacciones significativas y, como consecuencia, cambios en las variables de respuesta, se utilizó el programa estadístico R (x64, 4.2.3), a través de un análisis de varianzas (ANOVA) para un modelo factorial 3^2 , seguido por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($P < 0.05$).

Tabla 4. Tratamientos de secado de cáscara de tomate en el SBC.

Tratamiento	HR (%)	V. Aire (m/s)	Tiempo de secado (h)
1	10	0.5	8
2	20	0.5	9
3	30	0.5	12
4	10	1	7
5	20	1	8
6	30	1	10
7	10	1.5	4
8	20	1.5	5
9	30	1.5	6

10.2. Secado cáscara de tomate por el sistema SBC.

El secador asistido por bomba de calor (SBC) funciona a temperaturas relativamente bajas y se considera un método energéticamente eficiente. El secado a temperaturas más bajas permite una mayor retención de compuestos termolábiles (Bhatkar et al., 2021). Cabe destacar que este equipo funciona bajo un control de humedad relativa (%) en el cual, a cada humedad relativa (%) le corresponde una temperatura (°C) independientemente de la velocidad del aire (m/s) que se desee programar. En este caso los tratamientos a humedades relativas de 10, 20 y 30% les correspondieron temperaturas de secado de 60, 50 y 40 °C, respectivamente. Las muestras de cáscara de tomate sometidas a las distintas condiciones de humedad relativa (%)/temperatura (°C) y velocidad del aire (m/s) fueron tratadas hasta alcanzar una humedad final promedio inferior al 10% (b.h) (Tabla 5), esto con el objetivo de evitar la degradación de carotenoides durante el proceso de secado (Popescu et al., 2023). Las Figuras 8 y 9 muestran la variación de la velocidad de secado DR para los diferentes tratamientos evaluados.

Tabla 5. Cálculo del contenido de humedad final de las muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC.

Tratamiento	Peso cáscara inicial (g)	Humedad inicial (%)	Peso cáscara final (g)	Peso promedio (g)	Humedad final (%)
1	114.99±0.56	92.16	9.12	9.02	1.05±0.25
2	108.98±0.29	92.62	8.08	8.04	0.43±0.23
3	126.93±0.62	93.79	8.61	7.87	8.53±0.27
4	111.02±1.03	93.25	7.81	7.49	4.01±0.20
5	100.86±0.40	92.01	8.42	8.06	4.27±0.17
6	105.41±0.57	93.20	7.93	7.16	9.70±0.15
7	135.55±0.19	93.49	9.03	8.82	2.31±0.12
8	129.62±0.25	93.61	8.74	8.29	5.17±0.20
9	126.55±0.43	93.46	9.14	8.27	9.48±0.24

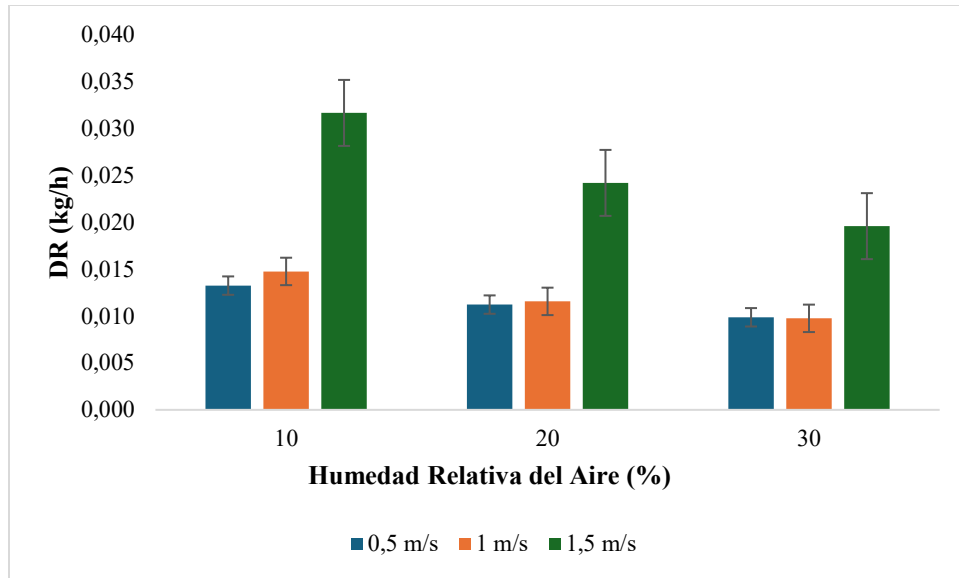


Figura 8. Variación de la velocidad de secado DR de cáscara de tomate por el sistema SBC.

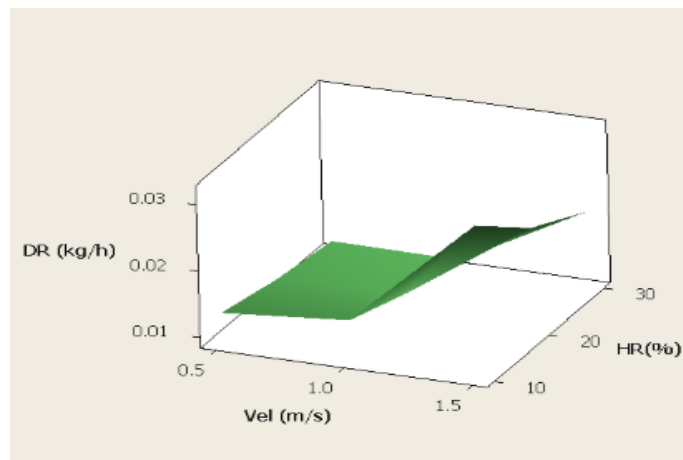


Figura 9. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre la velocidad de secado DR (kg/h).

En la Figura 8 se observó un descenso en la velocidad de secado (DR) conforme disminuyó la temperatura de procesamiento, esto debido al aumento de la humedad relativa. La influencia de la temperatura de secado es mayor que la del tiempo de secado en la eliminación de humedad, ya que a temperaturas más altas (60 °C), el tiempo de secado es más corto, esto debido a la formación de un gran gradiente de humedad que incrementa la capacidad del aire para absorber la humedad de las muestras (Tang et al., 2025). Lo anterior concuerda con lo afirmado por Coskun et al., (2017) los cuales observaron un aumento de 1.71 veces en la velocidad de secado de rodajas de tomate al aumentar en 10 °C la temperatura, acompañado de un aumento en el coeficiente de rendimiento.

De esta manera, la velocidad de secado DR fue más alta para tratamientos a bajas humedades relativas (10%) comparado con los tratamientos a 20 y 30% de humedad relativa para todos los casos y, al complementarse con el aumento de la velocidad del aire, dio como resultado un cambio en el área de la superficie de respuesta (Figura 9) para los tratamientos en los cuales se utilizó una velocidad del aire de 1.5 m/s. Por ende, el tratamiento a 10% HR y velocidad del aire de 1.5 m/s permitió alcanzar la mayor velocidad de secado (0.032 kg/h) entre todos los tratamientos analizados. Tang et al., (2025) en su investigación acerca del efecto del secado asistido por bomba de calor acoplado a secado solar en rodajas de tomate, evaluaron la velocidad de secado DR en función del contenido de humedad de las muestras utilizando humedades relativas del aire de 20, 40 y 60%; observando que, para la misma humedad relativa, la velocidad del aire aumentó la velocidad del secado DR y; a su vez, para las mismas velocidades del aire, el aumento en la humedad relativa redujo la velocidad de secado DR. Los valores obtenidos en este estudio concuerdan con encontrado por estos mismos autores, los cuales reportaron valores de velocidad de secado DR de 0.02 hasta 0.25 kg/h para tratamientos de secado a 20, 40 y 60% de HR para rodajas de tomate deshidratadas en un SBC asistido por secado solar. Por su parte, (Rulazi et al., 2024) reportaron valores de DR de hasta 0.27 kg/h para tomates y zanahorias con un contenido de humedad inicial del 93% (b.h) deshidratadas en un sistema SBC asistido por secado solar a 50 °C y velocidad de circulación de aire de 1.5 m/s durante 12 horas; condiciones que se consideran favorables para la conservación de los compuestos bioactivos termosensibles como el licopeno en tomates y sus subproductos. Lo observado en la literatura de dichos autores concuerda con la información consignada en las Figuras 8 y 9, resaltando que el efecto de las altas velocidades de circulación de aire (1.5 m/s) en la eliminación de agua de las muestras es incluso mayor que el efecto de la humedad relativa dentro del secador asistido por bomba de calor SBC.

Al momento de seleccionar una tecnología de secado específica para la fabricación de un producto viable económicamente, considerar el consumo energético de dicha operación es tan importante como la calidad del producto final. La principal ventaja del secador asistido por bomba de calor (SBC) es su menor consumo de energía, resultando eficaz para reducir el consumo energético en operaciones de secado en un 40-50% (Bhatkar et al., 2021). Las Figuras 10 a 13 ilustran la variación de la velocidad específica de extracción de humedad SMER y el consumo específico de

energía SEC del secador asistido por bomba de calor (SBC) para los diferentes tratamientos de secado de cáscara de tomate.

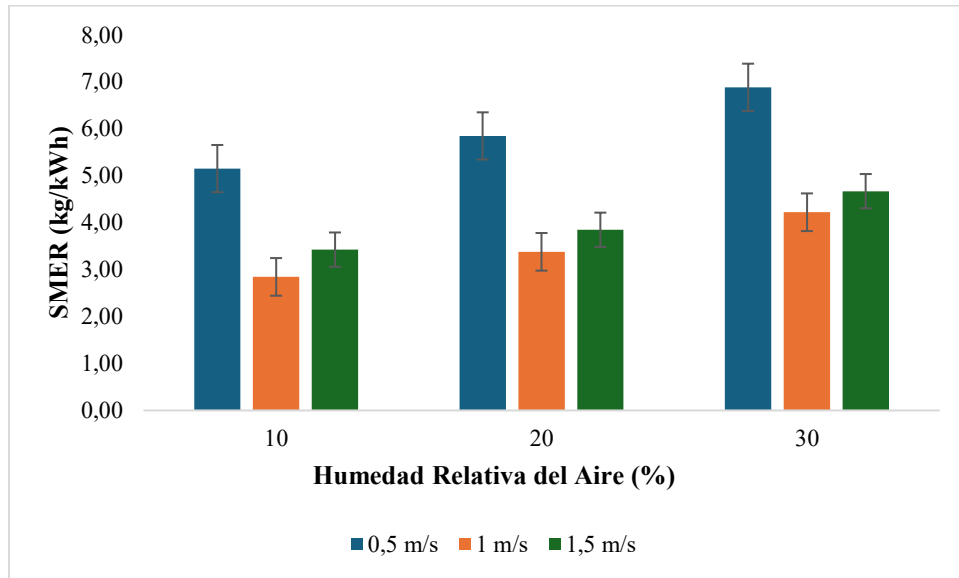


Figura 10. Variación de la velocidad específica de extracción de humedad SMER de cáscara de tomate por el sistema SBC.

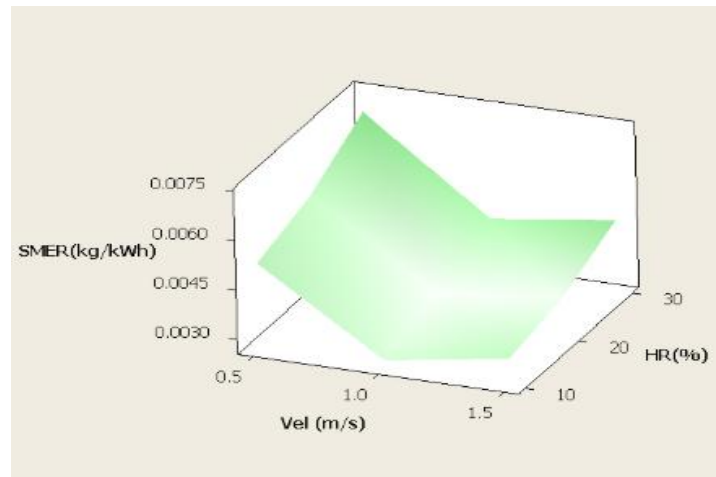


Figura 11. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre la velocidad específica de extracción de humedad SMER (kg/kWh).

En la Figura 10 se observa el aumento de la SMER conforme aumenta la humedad relativa del aire. Esto se debe a que los sistemas SBC operan de manera más eficiente cuando el gradiente térmico entre el evaporador y el aire es menor, fenómeno que ocurre cuando la humedad relativa

del aire es más alta y; a su vez, este alto contenido de humedad se traduce en una mayor capacidad de recuperación de calor, reduciendo el trabajo requerido por el compresor (Tang et al., 2025). Lo anterior se puede ver reflejado en la superficie de respuesta de la Figura 11, donde el pico máximo de velocidad de extracción de humedad (6.884 kg/kWh) se alcanzó a humedades relativas altas (30%) y velocidades de flujo de aire bajas (0.5 m/s). Karabacak & Atalay, (2010), quienes realizaron la comparación de las características de secado de rodajas de tomate por el sistema SBC y SBC asistido por secado solar a temperaturas entre 20 y 40 °C y flujos de aire de 2 m/s; encontraron valores de SMER que iban desde 0.105 hasta 3.4 kg/kWh para las muestras deshidratadas en el SBC. La diferencia en los valores reportados por estos autores y los encontrados en este estudio pueden ser debidos a la diferencia en la velocidad de flujo de aire, ya que como se muestra en las Figuras 10 y 11, a menor velocidad del aire (m/s) mayor SMER para tratamientos con humedades relativas (%) altas. No obstante, la máxima SMER (6.884 kg/kWh) encontrada en este estudio y sus pares para los distintos tratamientos ejecutados se encuentran dentro del rango de 0.156-9.25 kg/kWh reportado por Loemba et al., (2023) para el secado de productos agrícolas por el sistema SBC.

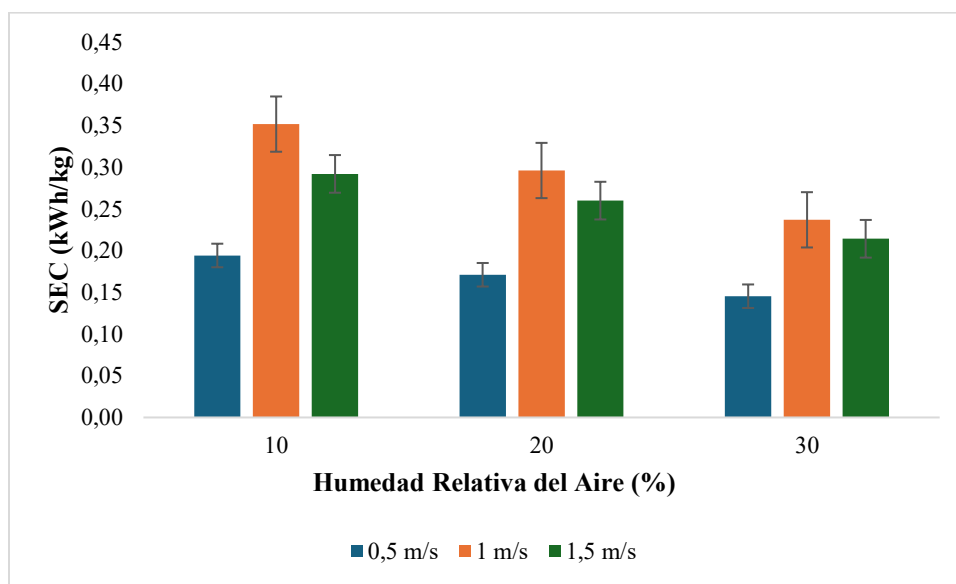


Figura 12. Variación del consumo específico de energía SEC en el secado de cáscara de tomate por el sistema SBC.

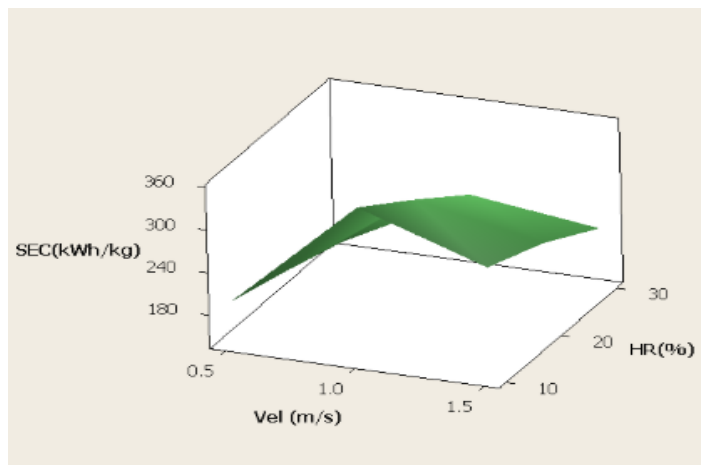


Figura 13. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre el consumo específico de energía SEC (kWh/kg).

Como se pudo observar en las Figuras 12 y 13, a medida que la humedad relativa era mayor, se presentaba un menor consumo de energía ya que la temperatura a la que funcionaba el equipo se hacía cada vez más baja. En cuanto a la relación consumo energético - velocidad del aire, se observó un antagonismo/punto de inflexión en la velocidad media de 1 m/s, debido a que se presentó un mayor consumo de energía en comparación con las velocidades máximas y mínimas de trabajo 0.5 y 1.5 m/s, respectivamente. Lo anterior pudo ser debido a la disminución significativa del tiempo de secado cuando la velocidad de circulación de aire fue de 1.5 m/s (Tabla 4) o a la interacción simultánea de los factores que condicionan el proceso (humedad relativa - velocidad del aire). De esta manera, el tratamiento de secado de cáscaras de tomate bajo condiciones de operación de 30% HR y 0.5 m/s presentó los valores más bajos para el consumo específico de energía SEC (0.1453 kWh/kg) y más altos para la velocidad de extracción de humedad SMER (6.884 kg/kWh). Por otro lado, el tratamiento a 10% HR y 1.5 m/s garantizó el menor tiempo de procesamiento (4 h) y la mayor velocidad de secado (0.032 kg/h). Teniendo en cuenta lo anterior, las mejores condiciones de operación (combinación HR/Velocidad del aire) dependerán, en todo caso, de los parámetros que se deseen priorizar, ya sea tiempo de procesamiento y DR o SEC y SMER.

10.3. Análisis colorimétrico de muestras de cáscara deshidratada.

La estabilidad del color de los pigmentos naturales es un indicador de calidad para su utilización en alimentos. Por esta razón, se realizó la medición por triplicado de los cambios en los parámetros

de color de las muestras de cáscara de tomate deshidratadas en un secador asistido por bomba de calor (SBC), en comparación con sus valores iniciales (muestra fresca) en cada tratamiento. Las Tablas 6 a 9 muestran los análisis de varianzas para el cambio porcentual en los parámetros de medición de color Δh^* , ΔC^* , Δa^* y el cambio total de color ΔE , respectivamente.

Tabla 6. ANOVA para el cambio porcentual en la tonalidad del color Δh^* .

Fuente de variación	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	F	P (>F)
Humedad	2	127.9	63.93	13.992	2.158×10^{-4}
Velocidad	2	666.0	332.98	72.871	2.344×10^{-9}
Humedad:Velocidad	4	3357.3	839.31	183.681	2.502×10^{-14}
Residual	18	82.2	4.57		

Un $P < 0.05$ indica que el efecto es estadísticamente significativo, en el caso del cambio porcentual en la tonalidad de color Δh^* , todos los efectos son estadísticamente significativos; sin embargo, la interacción presenta el nivel de significancia más alto. Esto va de la mano con la magnitud del efecto (suma de cuadrados), el cual resultó ser más alto en la interacción que para los efectos individuales. De esta manera, se puede afirmar que, aunque el efecto individual de ambos factores sobre el cambio en la tonalidad de las muestras analizadas fue significativo, el cambio de tonalidad depende principalmente de la combinación de los dos factores y evaluarlos de forma aislada puede llevar a interpretaciones incorrectas.

Tabla 7. ANOVA para el cambio porcentual en la pureza del color ΔC^* .

Fuente de variación	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	F	P (>F)
Humedad	2	0.136	0.068	0.0273	0.9731
Velocidad	2	204.129	102.065	40.9111	2.016×10^{-7}
Humedad:Velocidad	4	255.883	63.971	25.6418	3.190×10^{-7}
Residual	18	44.906	2.495		

Para el caso del cambio porcentual en la pureza del color ΔC^* , se observó que el efecto individual de la humedad sobre la variable de respuesta no fue estadísticamente significativo, mientras que la velocidad si tiene un efecto individual altamente significativo. La suma de cuadrados y el valor P muestran que el cambio en la pureza del color dependió principalmente de la velocidad del proceso; sin embargo, la combinación específica de niveles de humedad y velocidad también influyó de forma significativa.

Tabla 8. ANOVA para el cambio porcentual de color rojo Δa^* .

Fuente de variación	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	F	P (>F)
Humedad	2	52.58	26.29	5.4344	0.01424
Velocidad	2	643.32	321.66	66.4939	4.864×10^{-9}
Humedad:Velocidad	4	1130.27	282.57	58.4128	4.585×10^{-10}
Residual	18	87.07	4.84		

Para el cambio en el color rojo Δa^* de las cáscaras de tomate durante el proceso de secado, todos los factores por separado y la interacción fueron significativos; no obstante, la velocidad y su interacción con la humedad presentaron un efecto mucho mayor sobre la variable de respuesta. La suma de cuadrados muestra que el efecto de la interacción es casi el doble del efecto de la velocidad por sí solo; por ende, la interacción entre algunos niveles de humedad y velocidad pudieron influir en mayor medida en el cambio del color rojo de la cáscara de tomate.

Tabla 9. ANOVA para el cambio porcentual en el color total ΔE .

Fuente de variación	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	F	P (>F)
Humedad	2	50.402	25.201	74.783	1.904×10^{-9}
Velocidad	2	62.195	31.098	92.282	3.455×10^{-10}
Humedad:Velocidad	4	76.230	19.057	56.552	5.995×10^{-10}
Residual	18	6.066	0.337		

Para el cambio porcentual en el color total ΔE , todos los efectos tuvieron contribuciones significativas y, aunque la interacción humedad: velocidad siguió teniendo el mayor efecto, los efectos individuales también fueron muy importantes y, dado que, el residual es mínimo, se pueden considerar los factores por separado y su interacción al momento de analizar el cambio de color total en la muestras analizadas.

Al haber analizado los ANOVAS para los cambios porcentuales en los parámetros de color, se pudo identificar que el factor con la influencia más significativa en todas las variables fue la interacción entre humedad y velocidad. De manera que, para controlar de manera efectiva los cambios de color en las muestras de cáscara de tomate deshidratada, se debe priorizar la evaluación de la interacción entre los diferentes niveles de humedad y velocidad, prestando especial atención a la velocidad del aire.

Teniendo en cuenta lo anterior, en las Tablas 10 y 11 se puede observar el cambio en el color rojo Δa^* , la tonalidad Δh^* , la pureza ΔC^* y el cambio total de color (ΔE) de las muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC junto con los resultados de la prueba de comparación múltiple para el análisis de interacciones entre tratamientos; los cuales, a su vez, se ven ilustrados en las Figuras 14 a 16.

Tabla 10. Cambio de color en muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC.

HR (%)	V (m/s)	CAMBIOS EN PARÁMETROS DE COLOR			
		Δa^*	Δh^*	ΔC^*	ΔE
10	0.5	-8.5 ± 0.30^b	0.004 ± 0.026^a	-12.4 ± 0.90^b	12.6 ± 0.78^b
20	0.5	-12.9 ± 0.30^a	0.21 ± 0.012^c	-11.7 ± 0.59^b	16.9 ± 0.28^c
30	0.5	-7.3 ± 0.67^b	0.11 ± 0.012^b	-7.4 ± 0.72^a	8.3 ± 0.63^a
10	1	-7.3 ± 0.40^a	0.12 ± 0.012^c	-6.8 ± 0.31^a	8.9 ± 0.32^{ab}
20	1	-2.2 ± 0.63^b	-0.11 ± 0.017^a	-6.2 ± 0.29^a	8.26 ± 0.057^a
30	1	-6.8 ± 1.25^a	0.07 ± 0.026^b	-8.4 ± 0.97^a	9.5 ± 1.08^b
10	1.5	-8.9 ± 0.59^a	0.15 ± 0.012^c	-8.0 ± 0.80^a	11.8 ± 0.50^b
20	1.5	-8.3 ± 0.49^a	0.11 ± 0.014^b	-8.5 ± 0.53^a	11.9 ± 0.50^b
30	1.5	-6.6 ± 0.16^b	-0.001 ± 0.003^a	-9.3 ± 0.23^a	9.3 ± 0.22^a

Los resultados se presentan como las medias $\pm$ SD de análisis por triplicado. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0,05$).

Tabla 11. Cambio de color porcentual en muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el sistema SBC.

HR (%)	V (m/s)	CAMBIOS EN PARÁMETROS DE COLOR (%)			
		Δa^*	Δh^*	ΔC^*	ΔE
10	0.5	-32.406 ± 0.92^a	0.551 ± 3.2^a	-32.103 ± 1.73^a	12.6 ± 0.78^b
20	0.5	-44.169 ± 1.42^a	31.270 ± 2.43^c	-31.691 ± 1.55^a	16.9 ± 0.28^c
30	0.5	-31.400 ± 2.4^a	14.400 ± 1.7^c	-22.567 ± 1.98^b	8.3 ± 0.63^a
10	1	-31.039 ± 1.22^a	16.040 ± 1.68^b	-20.930 ± 0.77^b	8.9 ± 0.32^{ab}
20	1	-10.655 ± 2.83^c	-13.138 ± 1.68^a	-20.294 ± 0.87^c	8.26 ± 0.057^a
30	1	-30.916 ± 4.31^a	7.785 ± 3.22^b	-24.968 ± 2.28^{ab}	9.5 ± 1.08^b
10	1.5	-33.852 ± 1.89^a	21.118 ± 1.51^c	-23.015 ± 2.0^b	11.8 ± 0.50^b
20	1.5	-32.510 ± 1.75^b	14.688 ± 1.89^b	-24.137 ± 1.46^b	11.9 ± 0.50^b
30	1.5	-28.082 ± 0.45^a	-0.101 ± 0.37^a	-28.134 ± 0.64^a	9.3 ± 0.22^a

Los resultados se presentan como las medias $\pm$ SD de análisis por triplicado. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0,05$).

La Figura 14 muestra el cambio que se presentó en la coloración roja Δa^* de la cáscara de tomate durante los diferentes tratamientos térmicos, dichos cambios indican la disminución en el valor de dicho parámetro e indirectamente sugieren que se produjeron cambios en la composición de la cáscara de tomate deshidratada. Por su parte, la Figura 16 muestra el cambio de color total ΔE en las muestras tratadas y, al comparar dichos resultados con lo ilustrado en la Figura 14, se observó

que el cambio de color total ΔE se ve influenciado por el descenso en la coloración roja Δa^* de la cáscara de tomate debido al tratamiento térmico (Albanese et al., 2014).

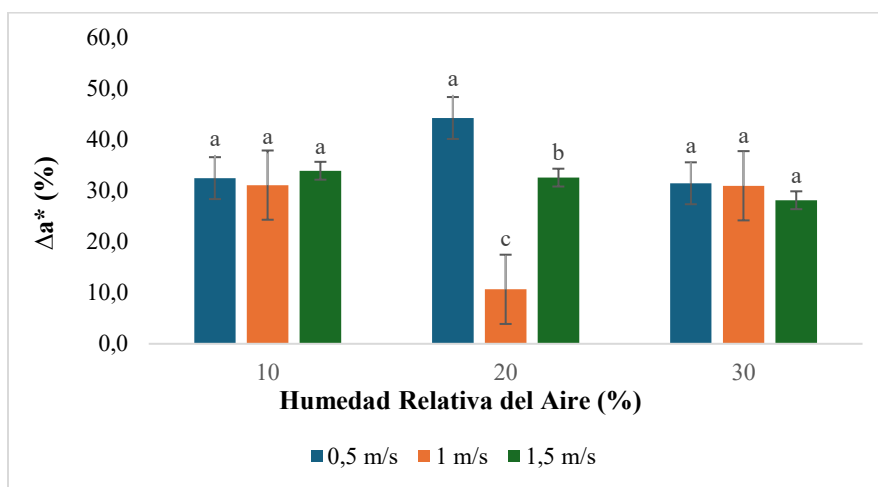


Figura 14. Cambio porcentual de color rojo (Δa^*) (en valor absoluto) de cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0.05$).

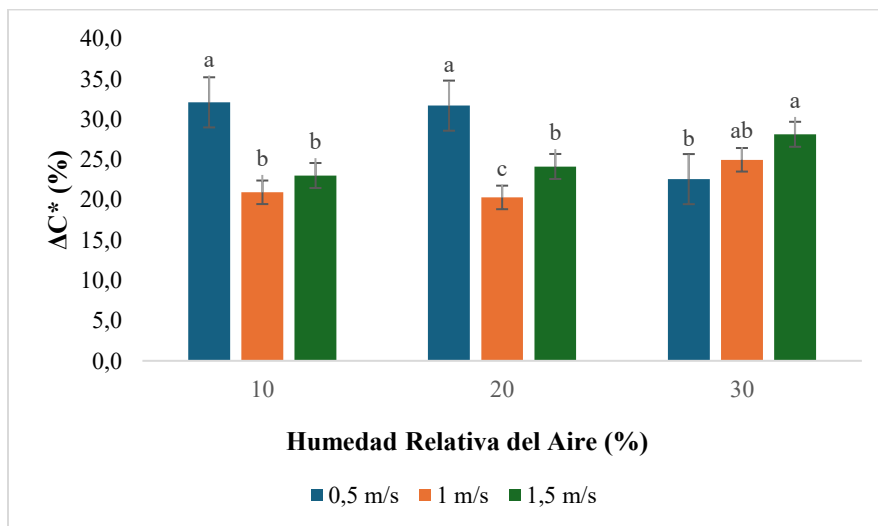


Figura 15. Cambio porcentual en la pureza del color (ΔC^*) (en valor absoluto) de cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0.05$).

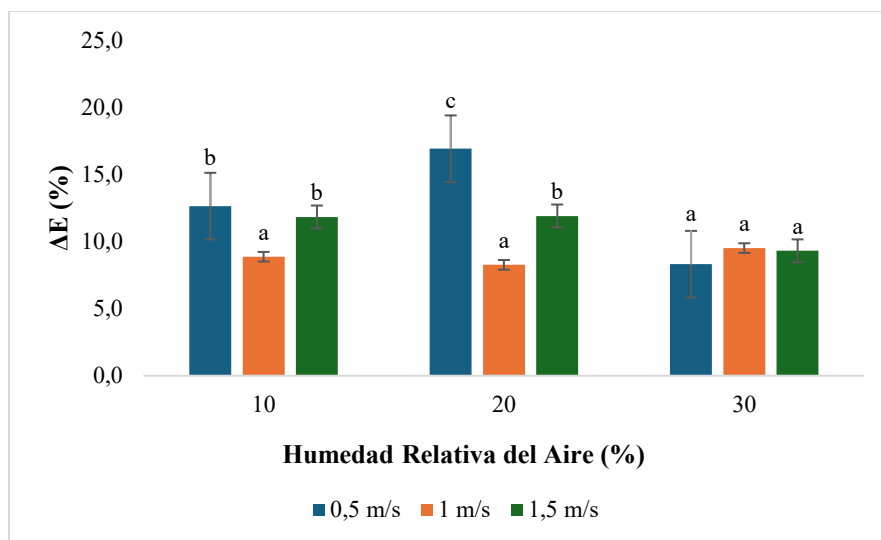


Figura 16. Cambio de color total porcentual (ΔE) de cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0.05$).

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 10, los valores del croma C^* disminuyeron significativamente en todos los procesos de secado, a diferencia de los valores del ángulo de tono h^* que, al aumentar en casi todos los tratamientos y encontrarse cerca de 0, representaron un tono rojo más intenso (Albanese et al., 2014). Específicamente, la combinación de factores 20% HR (50 °C) y 1 m/s (Tabla 11) fue el tratamiento que influyó en menor medida en la disminución de los parámetros de color en comparación con la cáscara fresca, presentando los valores más bajos para el cambio porcentual de croma ΔC^* (20.29 %), el ángulo de tono Δh^* (13.14%), la coloración roja Δa^* (10.65%) y el cambio de color total ΔE (8.26%). Cabe destacar que, este tratamiento de secado representa tanto humedad relativa (20%) como la velocidad (1 m/s) medias utilizadas en la experimentación y, por ende, también el tiempo medio de tratamiento (8 h). Lo anterior coincide con lo reportado por Tang et al., (2025) quienes realizaron la medición del cambio de color de rodajas de tomate deshidratadas en un SBC asistido por secado solar bajo condiciones de secado de 20, 40 y 60% HR y temperaturas de secado de 50, 60 y 70 °C; observando que las rodajas de tomate deshidratadas a 50 °C y 20% HR presentaron la mayor similitud de color con las rodajas de tomate fresco, con el menor valor de ΔE (7.03%) y Δa^* (21.06%). La razón para esto, en términos de la composición del tomate y sus subproductos como la cáscara, se debe a la presencia de azúcares y aminoácidos. Debido a esto, una mayor velocidad del aire caliente y humedades

relativas HR bajas provocan un aumento de la temperatura de las muestras de cáscara de tomate, lo que a su vez acelera la reacción de Maillard entre azúcares y aminoácidos, formando compuestos marrones que afectan el color. Si la temperatura de secado es demasiado alta, el cambio de color se intensifica, como en el caso de los tratamientos a 10% HR (60 °C), resultando en una apariencia más oscura (Zhang et al., 2020).

La diferencia de color total ΔE proporciona información sobre las diferencias de color percibidas por el ojo humano y de acuerdo con la literatura de Albanese et al., (2014), valores de ΔE superiores a 3.5 indican cambios de color significativamente perceptibles en alimentos. Teniendo en cuenta lo anterior, aunque se encontró un tratamiento de secado que reduce los cambios en la coloración de la cáscara de tomate en comparación con los demás tratamientos (20% HR, 50 °C y 1 m/s) (Figura 16), cabe resaltar que el cambio total en la coloración, representado por el parámetro ΔE , fue bastante evidente.

De igual manera, al demostrarse que existe una interacción significativa entre las variables de proceso mediante los análisis de varianza ($p < 0,05$), se puede explicar la variabilidad encontrada en los resultados, tanto en los parámetros de secado como en el cambio de los parámetros de color, como una consecuencia de la influencia conjunta de los factores humedad relativa (temperatura) y velocidad del aire. Específicamente, la velocidad del aire, una variable de proceso contemplada como significativa en los cálculos de eficiencia energética, es generalmente obviada en los procesos de secado para el cálculo de propiedades fisicoquímicas y de composición química de alimentos, haciendo principal énfasis en la influencia de la temperatura y tiempo de secado en dichas propiedades.

10.4. Estimación de la concentración de licopeno en muestras de cáscara de tomate deshidratadas.

El licopeno es un pigmento bioactivo que se encuentra en grandes cantidades en los tomates y puede ser extraído de subproductos del tomate y usado como colorante natural, proporcionando una gama de colores que va desde rojo hasta amarillo. Debido a su sensibilidad, es importante encontrar las condiciones de secado que garanticen una alta retención y estabilidad del licopeno (Souza et al., 2023). A su vez, una de las principales ventajas del SBC es la retención de compuestos termolábiles y una calidad comparable a la del producto fresco (Bhatkar et al., 2021).

Los resultados del análisis de varianza para la concentración de licopeno y β -caroteno en cáscara de tomate por el método espectrofotométrico se muestran en la Tablas 12 y 13.

Tabla 12. ANOVA para la concentración de licopeno (mg/100g).

Fuente de variación	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	F	P (>F)
Humedad	2	855.60	427.80	58.440	1.343×10^{-8}
Velocidad	2	982.73	491.37	67.124	4.513×10^{-9}
Humedad:Velocidad	4	997.27	249.32	34.059	3.594×10^{-8}
Residual	18	131.77	7.32		

Tabla 13. ANOVA para la concentración de β -caroteno (mg/100g).

Fuente de variación	Grados Libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	F	P (>F)
Humedad	2	55.361	27.681	30.369	1.705×10^{-6}
Velocidad	2	111.954	55.977	61.414	9.104×10^{-9}
Humedad:Velocidad	4	103.543	25.886	28.400	1.469×10^{-7}
Residual	18	16.406	0.911		

Mediante el análisis de varianza se pudo observar como la velocidad y la humedad afectan de forma significativa la concentración de licopeno y β -caroteno, con la velocidad mostrando un efecto ligeramente más dominante, como en el caso del cambio porcentual en los parámetros de color. No obstante, existe una interacción estadísticamente significativa entre los dos factores y; de esta manera, se debe analizar su efecto en conjunto. La Tabla 14 muestra las concentraciones de licopeno y β -caroteno en cáscara de tomate deshidratada por el sistema SBC y las Figuras 17 a 19 ilustran los resultados de la prueba de comparación múltiple para los diferentes tratamientos efectuados.

Tabla 14. Estimación de la concentración de licopeno y β -caroteno en cáscaras de tomate deshidratadas por el sistema SBC.

HR (%)	V (m/s)	Absorbancia (nm)			Concentración de Licopeno y β -caroteno	
		450	472	502	Lic. (mg/100g)	β -Caroteno (mg/100g)
10	0.5	0.913	1.101	0.800	29.8 $\pm$ 0.69 ^a	8.9 $\pm$ 0.18 ^a
20	0.5	0.861	1.037	0.740	31.5 $\pm$ 0.31 ^a	8.60 $\pm$ 0.074 ^a
30	0.5	0.941	1.133	0.820	32 $\pm$ 1.0 ^b	9.5 $\pm$ 0.15 ^a
10	1	1.048	1.236	0.883	40 $\pm$ 1.1 ^b	9.8 $\pm$ 0.34 ^a
20	1	1.502	1.691	1.280	53 $\pm$ 2.3 ^c	14 $\pm$ 1.3 ^b
30	1	0.669	0.818	0.607	25 $\pm$ 2.0 ^a	8.6 $\pm$ 0.96 ^a
10	1.5	1.723	1.872	1.533	56.6 $\pm$ 0.38 ^c	18.2 $\pm$ 0.51 ^c
20	1.5	1.361	1.667	1.198	46 $\pm$ 1.4 ^b	14.2 $\pm$ 0.85 ^b
30	1.5	1.085	1.287	0.928	35 $\pm$ 1.2 ^b	9.5 $\pm$ 0.35 ^a

Los resultados se presentan como las medias $\pm$ SD de análisis por triplicado. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0.05$).

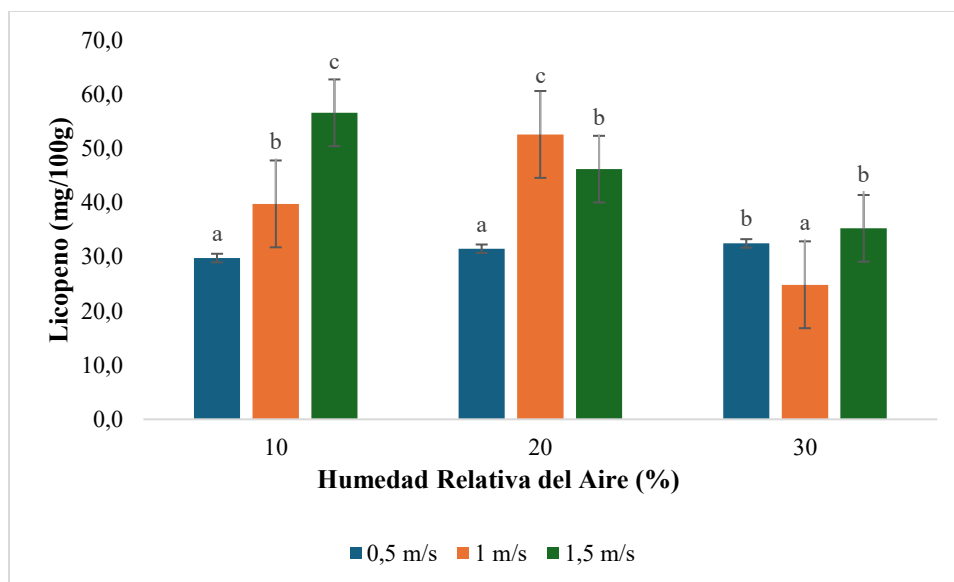


Figura 17. Concentración de licopeno en cáscaras de tomate deshidratadas por el sistema SBC. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0.05$).

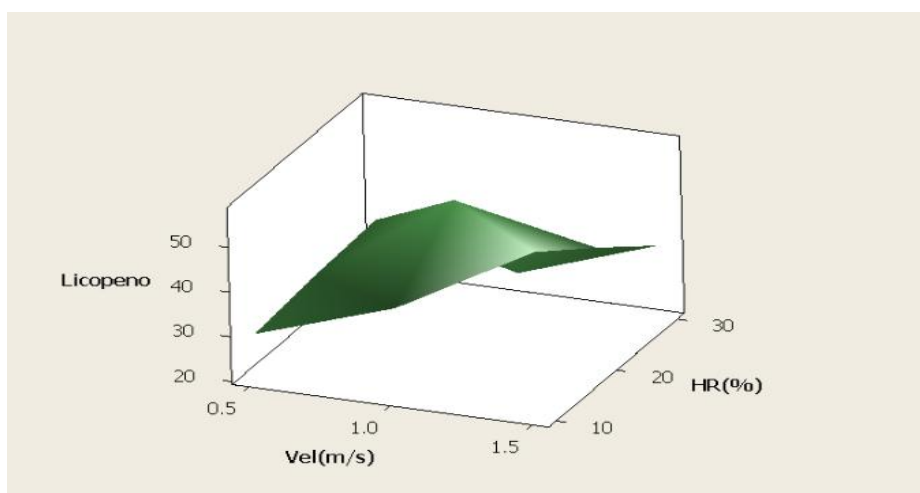


Figura 18. Superficie de respuesta para el efecto de la HR (%) y Vel (m/s) sobre la concentración de licopeno (mg/100g).

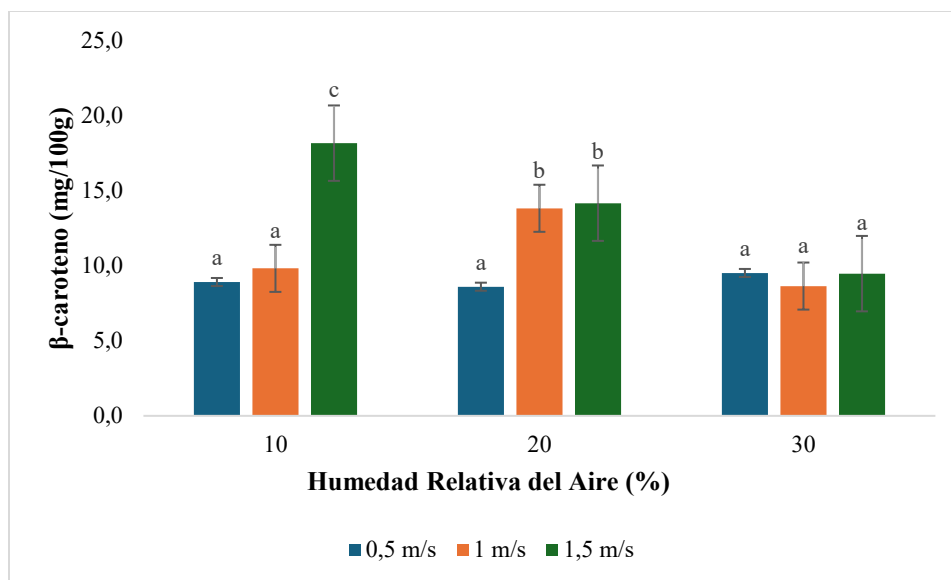


Figura 19. Concentración de β -caroteno en cáscaras de tomate deshidratadas por el sistema SBC. Diferentes letras entre columnas representan una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de secado determinados por la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p < 0.05$).

De acuerdo con las muestras evaluadas, el tratamiento de secado a 10% de humedad relativa y velocidad del aire de 1.5 m/s presentó la mayor concentración de licopeno en la cáscara de tomate deshidratada, resultando en un estimado de 56.6 mg/100g. Sin embargo, por la prueba de comparación múltiple, no se encontraron diferencias significativas entre este tratamiento y el efectuado a 20% HR y 1 m/s, para el cual; a su vez, se obtuvieron los mejores resultados en cuanto al cambio porcentual de color y la concentración de licopeno fue de 53 mg/100g. Dichos resultados son comparables con lo analizado por Souza et al., (2023) quienes, al evaluar la influencia de diferentes tecnologías de secado en la concentración de licopeno de subproductos del tomate, determinaron que el secado con aire a 60 °C de una fracción de tomate rica en cáscara (>60%) incrementó la concentración de licopeno cuantificable comparado con la muestra fresca. Estos mismos autores encontraron que la fracción de tomate rica en cáscara, deshidratada en un secador de aire a 60 °C presentó un mayor contenido de licopeno (entre 47.6 y 98.9 mg/100g), comparado con el contenido de licopeno en pulpa (11.9-55.6) y pulpa rica en semillas (10.9-24.6 mg/100g) utilizando el mismo método de secado.

La temperatura de secado, la cual está directamente relacionada con la humedad relativa del aire en el sistema SBC, también influye en la cantidad de extracto obtenido. Las condiciones de operación relacionadas con la mayor concentración de licopeno en las muestras analizadas coincidieron con la mayor temperatura (60 °C, obtenida a 10% de humedad relativa), el menor tiempo de secado (4h, con una velocidad del aire de 1.5 m/s) y con los parámetros que condujeron al menor cambio de color en las muestras de cáscara deshidratadas (20% HR y 1 m/s). Resultados similares fueron observados por los mismos autores, Souza et al., (2023) utilizando un secador flash en espiral, donde la reducción en el tiempo de proceso explica la alta retención de licopeno (55.6 mg/100g), facilitando la extracción de dicho compuesto a partir de la cáscara de tomate. Por su parte, Popescu et al., (2023) realizaron el secado con aire caliente de cáscaras de tomate a temperaturas de 50-65 °C, estimando que la concentración de licopeno en las muestras secas variaba entre 31.16 - 95.56 mg/100g. En contraste, tratamientos térmicos por un periodo prolongado de tiempo, como los efectuados a altas HR (30%) produjeron cambios de color directamente relacionados con el contenido de licopeno en la cáscara de tomate (Bakir et al., 2023). Tan et al., (2021) evaluaron la influencia de secado con aire caliente y la liofilización en el contenido de licopeno de tres diferentes cultivos de tomate, determinando que la liofilización reducía significativamente la concentración de licopeno en todos los cultivos, esto debido al prolongado tiempo de proceso; en cambio, la concentración de licopeno aumentó en todos los cultivos después del secado con aire caliente, desde concentraciones entre 16.11-29.39 mg/100g para tomate fresco hasta concentraciones entre 20-50 mg/100g en tomate secado con aire caliente, coincidiendo estas últimas con los valores reportados en este estudio para la cáscara de tomate deshidratada (Tabla 14).

Además, en los tomates frescos, el licopeno se encuentra en la forma all-trans, la más estable termodinámicamente y las condiciones térmicas desencadenan la isomerización de la forma trans a la forma cis. La forma cis es inestable, pero presenta una solubilidad relativamente mayor en disolventes orgánicos que la forma trans y también se ha demostrado que la forma cis es relativamente más biodisponible. La presencia de oxígeno es otro factor que presenta una gran influencia en la concentración de licopeno en el tomate y sus subproductos, conduciendo a la isomerización de la forma all-trans a la forma cis, que es la más susceptible a la oxidación en el aire. Sin embargo, la forma cis, al ser más soluble en disolventes orgánicos, aumenta la extracción

de licopeno durante el análisis (Bhatkar et al., 2021). El hecho de que el licopeno en la cáscara de tomate se encuentra mayormente en forma ligada, indica la necesidad de procesamiento térmico para romper las membranas y paredes celulares para liberar dicho pigmento de la parte insoluble del tomate, lo que incrementa su biodisponibilidad (Jayathunge et al., 2017). Dicho aumento en la biodisponibilidad del licopeno se debe principalmente a la liberación de fitoquímicos de la matriz de alimento, lo que lo hace más accesible para su extracción y cuantificación (Dewanto et al., 2002). Además, cabe destacar que, con el alto contenido de humedad inicial que presenta el tomate y sus subproductos, solo se podría extraer una parte del licopeno que no representaría el verdadero contenido de este (Vasapollo et al., 2004).

Contrariamente, varios estudios indicaron que el licopeno se degrada fácilmente durante el procesamiento térmico. Estos resultados inconsistentes en la literatura podrían explicarse por diferencias en el estado de maduración, la firmeza, el genotipo de los tomates, las temperaturas de secado y el tiempo de secado (Tan et al., 2021). En especial, la relación temperatura - tiempo de secado es uno de los principales factores a tener en cuenta al momento de reducir la degradación del licopeno durante el procesamiento térmico, debido a que, aunque dicho tratamiento aumente la biodisponibilidad de compuestos de importancia, tiempos de tratamiento prolongados y temperatura de secado, especialmente por encima de 60 °C aceleran la degradación de estos.

Los valores obtenidos en este estudio (Tabla 14) coincidieron con otros estudios que reportaron concentraciones de licopeno en 100g de cáscara de tomate deshidratada entre 16 mg (Vallecilla-Yepes & Ciftci, 2018), 18 mg (Lavecchia & Zuorro, 2008), 23.41 mg (Albanese et al., 2014) hasta 82 mg (Machmudah et al., 2012). Sin dejar de lado la concentración de β -caroteno, el segundo carotenoide más abundante en el tomate y asociado principalmente con el color naranja del tomate y sus subproductos como la cáscara, en cuyos estudios han calculado concentraciones de este compuesto que van desde 2.70 mg (Rizk et al., 2014), 4.60 mg (Topal et al., 2006), 13.52 mg (Calvo et al., 2007), hasta 151 mg (Machmudah et al., 2012) por 100g de cáscara de tomate deshidratada. De este modo, los contenidos de licopeno en las muestras de cáscara de tomate deshidratadas por el método de secado asistido por bomba de calor (SBC) fueron comparables y las diferencias entre los valores y el amplio rango de las concentraciones de carotenoides en las cáscaras de tomate deshidratadas al comparar diversos estudios, pueden ser debidas al contenido

de humedad de la muestra, las tecnologías de secado utilizadas, las condiciones del proceso, la variedad de tomate, condiciones de cultivo y su tratamiento pre y postcosecha (Popescu et al., 2023).

11. LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo principal evaluar la influencia del secado asistido por bomba de calor en la concentración de licopeno en cáscaras de tomate deshidratadas. En este sentido, se logró establecer una comparación del contenido de licopeno de la cáscara fresca y deshidratada por otros métodos de secado (presentes en la literatura) con la cáscara deshidratada por el sistema de secado asistido por bomba de calor (SBC). Sin embargo, el estudio presentó ciertas limitaciones técnicas y operativas que restringieron el desarrollo completo del análisis propuesto.

Una de las principales limitaciones fue la imposibilidad de llevar a cabo cinéticas de degradación del licopeno, debido a las exigencias del procedimiento de extracción en intervalos de tiempo muy cortos. Esta tarea demandaba una mayor disponibilidad de personal y recursos que no se encontraban disponibles, además de la lejanía entre el sitio donde se realizó el proceso de secado y el sitio donde se realizó la extracción.

Así mismo, no fue posible llevar a cabo las cinéticas de secado de las cáscaras de tomate. Esto debido a que la balanza acoplada al sistema de secado asistido por bomba de calor no contaba con la sensibilidad necesaria para registrar los pequeños cambios de peso en las muestras, lo cual imposibilitó obtener los datos precisos sobre la pérdida de humedad en función del tiempo. Otra limitación técnica observada durante el proceso fue la influencia de la apertura del equipo sobre las variables del proceso. Al manipular el sistema, se generaban fluctuaciones en la temperatura y la humedad relativa, lo cual afectaba la estabilidad de la cámara de secado y aumentaba la incertidumbre en las mediciones.

Por último, para futuros trabajos se sugiere contar con un equipo de trabajo más amplio que permita realizar la cuantificación del licopeno en intervalos cortos de tiempo y así poder evaluar la influencia del tratamiento térmico en la concentración de licopeno conforme transcurre el proceso de secado; así como explorar la posibilidad de realizar modelados matemáticos o simulaciones que

complementen los datos experimentales y ayuden a interpretar los resultados con una mayor profundidad.

12. CONCLUSIONES

El presente estudio ha demostrado que el secado asistido por bomba de calor (SBC) es una opción eficiente y favorable para la deshidratación de cáscaras de tomate, permitiendo obtener un producto con una buena retención de compuestos bioactivos como licopeno y β -caroteno, mientras se minimiza el consumo energético. Los resultados obtenidos muestran que, al operar el SBC a temperaturas moderadas (50-60 °C), humedades relativas bajas (10-20% HR) y velocidades de aire altas (1-1.5 m/s) se obtiene un menor tiempo de secado y mayor velocidad de secado (DR). Esto también facilita la extracción y retención del licopeno, un pigmento natural que, en este estudio, alcanzó su mayor concentración en el tratamiento de 10% HR (60 °C) y 1.5 m/s sin diferencias significativas con el tratamiento a 20% HR y 1 m/s, con valores estimados de entre 53-56.6 mg/100g, lo que fue comparable con los resultados reportados en estudios previos. Por su parte, la operación del SBC a temperaturas bajas (40 °C), humedades relativas altas (30% HR) y velocidades de aire bajas (0.5 m/s) contribuyó a la disminución del consumo específico de energía SEC (0.1453 kWh/kg) y el aumento de la velocidad específica de extracción de humedad SMER (6.884 kg/kWh).

En cuanto a la calidad del producto, se observó que las condiciones térmicas influenciaron los parámetros de color de las cáscaras de tomate deshidratadas, destacándose una disminución en la coloración roja (a^*) y en el croma (C^*), lo que sugiere un cambio significativo en la composición de los pigmentos. Sin embargo, la combinación de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire a niveles intermedios (20% HR, 50 °C y 1 m/s) fue la que generó los menores cambios en los parámetros de color y presentó un equilibrio entre la retención de licopeno y la calidad visual del producto.

Un hallazgo relevante sugiere que la velocidad del aire tiene una influencia importante en la reducción del tiempo de secado, siendo que las velocidades intermedias (1 m/s) mostraron un balance entre eficiencia energética y preservación de los compuestos sensibles al calor, como los carotenoides. Además, el secado a temperaturas más altas, si bien optimiza el proceso en términos de tiempo, puede generar un aumento en la degradación de los compuestos como el licopeno, lo

que refuerza la importancia de ajustar las condiciones de secado para cada tipo de subproducto y objetivo deseado.

Por lo tanto, este estudio sugiere que el SBC es una tecnología prometedora para la producción de cáscaras de tomate con altas concentraciones de licopeno y una gran eficiencia energética. El correcto ajuste de las condiciones de secado (humedad relativa y velocidad del aire) es fundamental para obtener un producto de alta calidad, minimizando la degradación de compuestos sensibles y maximizando el aprovechamiento de los recursos energéticos, lo cual es clave para la viabilidad de procesos de secado a gran escala.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-hammed, M., Adewale Bello, I., & Olusegun Oladoye, S. (2013). Simultaneous spectrophotometric determination of lycopene and beta- carotene concentrations in carotenoid mixtures of the extract of tomatoes , papaya and orange juice. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research, Ser. B: Biol. Sci*, 56(2), 90–97. <https://doi.org/10.52763/PJSIR.BIOL.SCI.56.2.2013.90.97>
- Albanese, D., Adiletta, G., Acunto, M. D., Cinquanta, L., & Matteo, M. Di. (2014). Original article Tomato peel drying and carotenoids stability of the extracts. *International Journal of Food Science & Technology*, 49, 2458–2463. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12602>
- An, B. K., Kim, D. H., Joo, W. D., Kang, C. W., & Lee, K. W. (2019). Effects of lycopene and tomato paste on oxidative stability and fatty acid composition of fresh belly meat in finishing pigs. *Italian Journal of Animal Science*, 18(1), 630–635. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1549963>
- Andreou, V., Dimopoulos, G., Dermesonlouoglou, E., & Taoukis, P. (2020). Application of pulsed electric fields to improve product yield and waste valorization in industrial tomato processing. *Journal of Food Engineering*, 270(June 2019), 109778. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109778>
- Bakir, S., Hall, R. D., Vos, R. C. H. De, Mumm, R., Kadakal, Ç., & Capanoglu, E. (2023). Effect of drying treatments on the global metabolome and health-related compounds in tomatoes. *Food Chemistry*, 403, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134123>

- Bhatkar, N. S., Shirkole, S. S., Mujumdar, A. S., & Bhaskar, N. (2021). Drying of tomatoes and tomato processing waste : a critical review of the quality aspects. *Drying Technology*, 39(11), 1720–1744. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1910832>
- Briones-Labarca, V., Giovagnoli-Vicuña, C., & Cañas-Sarazúa, R. (2019). Optimization of extraction yield, flavonoids and lycopene from tomato pulp by high hydrostatic pressure-assisted extraction. *Food Chemistry*, 278(November 2018), 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.106>
- Calvo, M., Dado, D., & Santamaria, G. (2007). Influence of extraction with ethanol or ethyl acetate on the yield of lycopene. *European Food Research and Technology*, 224(5), 567–571. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0335-8>
- Candelas, M. G., Alanís, M. G. J., Bautista, M., Del Río, F., & García, C. (2005). Contenido de Licopeno en jugo de tomate secado por aspersión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4(3), 299–307. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62040309>
- Colak, N., & Hepbasli, A. (2009). A review of heat pump drying: Part 1 - Systems, models and studies. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2180–2186. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.04.031>
- Coskun, S., Doymaz, I., Tunckal, C., & Erdogan, S. (2017). Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. *Heat Mass Transfer*, 53(6), 1863–1871. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1946-7>
- DANE. (2024). *Boletín técnico del Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario*.
- de Andrade Lima, M., Kestekoglou, I., Charalampopoulos, D., & Chatzifragkou, A. (2019). Supercritical fluid extraction of carotenoids from vegetable waste matrices. *Molecules*, 24(3). <https://doi.org/10.3390/molecules24030466>
- Del Valle, M., Cámara, M., & Torijo, M. (2006). Chemical characterization of tomato pomace. *Journal of the Food Science and Agriculture*, 86, 1232–1236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.2474>

- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K., & Hai Liu, R. (2002). Thermal processing Enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–3014. <https://doi.org/10.1021/jf0115589>
- Gámez, M. del C. L. (2017). *Aprovechamiento de derivados de tomate, como fuente de licopeno, en productos cárnicos tradicionales y tratados con radiaciones ionizantes*. <http://eprints.ucm.es/45731/1/T39449.pdf>
- Gómez-Daza, J. C. (2023). Innovación operativa de un secador asistido por bomba de calor con enfoque energético y aplicación a materiales agroalimentarios. *Ing-NOVA*, 2(2), 132–145. <https://doi.org/10.32997/rin-2023-4345>
- Gómez, M. (2009). *Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias*. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Guevara, S., & López, J. (2013). Evaluación del secado convectivo asistido con bomba de calor en muestras de Mango Tommy (*Mangifera indica* L.). In *Universidad del Valle* (Vol. 1).
- Hou, H., Chen, Q., Bi, J., Wu, X., Jin, X., Li, X., Qiao, Y., & Lyu, Y. (2020). Understanding appearance quality improvement of jujube slices during heat pump drying via water state and glass transition. *Journal of Food Engineering*, 272(October 2019), 109874. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109874>
- Jayathunge, K. G., Stratakis, A., Cregenzán-Albertia, O., Grant, I., Lyng, J., & Koidis, A. (2017). Enhancing the lycopene in vitro bioaccessibility of tomato juice synergistically applying thermal and non-thermal processing technologies. *Food Chemistry*, 221, 698–705. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.117>
- Karabacak, R., & Atalay, Ö. (2010). Comparison of drying characteristics of tomatoes with heat pump dehumidifier system , solar-assisted system and natural drying Comparison of drying characteristics of tomatoes with heat pump dehumidifier system , solar-assisted system and natural drying. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(2), 190–194. <https://doi.org/10.1234/4.2010.1600>
- Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Suppavorasatit, I., & Cadwallader, K. R. (2019). Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee.

- Food Chemistry*, 291(November 2018), 49–58.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>
- Kumar, S., Jadhav, S. V., & Thorat, B. N. (2022). Life cycle assessment of tomato drying in heat pump and microwave vacuum dryers. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1700–1705.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.333>
- Lavecchia, R., & Zuorro, A. (2008). Improved lycopene extraction from tomato peels using cell-wall degrading enzymes. *European Food Research and Technology*, 228, 153–158.
<https://doi.org/10.1007/s00217-008-0897-8>
- Lee, M. T., & Chen, B. H. (2002). Stability of lycopene during heating and illumination in a model system. *Food Chemistry*, 78(4), 425–432. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00146-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00146-2)
- Loemba, A. B. T., Kichonge, B., & Kivevele, T. (2023). Comprehensive assessment of heat pump dryers for drying agricultural products. *Energy Science & Engineering*, 11, 2985–3014.
<https://doi.org/10.1002/ese3.1326>
- Machmudah, S., Sugan Winardi, Z., Sasaki, M., Goto, M., Kusumoto, N., & Hayakawa, K. (2012). Lycopene extraction from tomato peel by-product containing tomato seed using supercritical carbon dioxide. *Journal of Food Engineering*, 108, 290–296.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.012>
- Margotta, M., & De Simone, M. C. (2020). Supercritical fluid extraction of lycopene and omega-3. *New Technologies, Development and Applications*, 750–758.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_85
- Martínez-Hernández, G. B., Boluda-Aguilar, M., Taboada-Rodríguez, A., Soto-Jover, S., Marín-Iniesta, F., & López-Gómez, A. (2016). Processing, packaging, and storage of tomato products: Influence on the lycopene content. *Food Engineering Reviews*, 8, 52–75.
<https://doi.org/10.1007/s12393-015-9113-3>
- Mohammadi, I., Tabatabaekoloor, R., & Motevali, A. (2019). Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices. *Energy*, 170, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.099>

- Muñoz-Botina, K., & Vivas-Ruiz, D. (2015). Aplicación del sistema de bomba de calor en el secado de Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*). *Universidad Del Valle, July*, 1–23.
- Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J. D. J., Ruiz-Cruz, S., Ibarra-Junquera, V., Pérez-Martínez, J. D., Guevara-Arauza, J. C., & Aguilar, C. N. (2013). TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN PARA LA PRESERVACIÓN DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *BIOtecnica*, 15(2), 39. <https://doi.org/10.18633/bt.v15i2.148>
- Oliag-Talens, P. (2017). Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB. *Tecnología de Alimentos*, 1–7. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83392/Talens> - Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB.
- Padilla-Frías, K., Granados-Conde, C., Leon-Mendez, G., Arrieta Pineda, Y., & Torrenegra-Alarcon, M. (2018). Evaluating the influence of temperature on drying processes. *@Limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 16(1), 107–117.
- Palomo, I., Concha-Meyer, A., Lutz, M., Said, M., Sáez, B., Vázquez, A., & Fuentes, E. (2019). Chemical characterization and antiplatelet potential of bioactive extract from tomato pomace (byproduct of tomato paste). *Nutrients*, 11(2), 1–10. <https://doi.org/10.3390/nu11020456>
- Pataro, G., Carullo, D., Bakar Siddique, M. A., Falcone, M., Donsì, F., & Ferrari, G. (2018). Improved extractability of carotenoids from tomato peels as side benefits of PEF treatment of tomato fruit for more energy-efficient steam-assisted peeling. *Journal of Food Engineering*, 233, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.029>
- Popescu, M., Iancu, P., Plesu, V., Sorin Bildea, C., & Ancuta Manolache, F. (2023). Mathematical Modeling of Thin-Layer Drying Kinetics of Tomato Peels: Influence of Drying Temperature on the Energy Requirements and Extracts Quality. *Foods*, 12(20), 3883. <https://doi.org/10.3390/foods12203883>
- Reyes, C. (2021). *Evaluación de métodos de extracción asistida por ultrasonido y microondas para la liberación de compuestos de interés desde pomasa de tomate deshidratada* (Vol. 1). [Universidad de Talca].

<http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/12551/3/2021A000283.pdf>

- Rizk, E., El-kady, A., & El-Bialy, A. (2014). Characterization of carotenoids (lyco-red) extracted from tomato peels and its uses as natural colorants and antioxidants of ice cream. *Food Technology*, 59(1), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2014.06.008>
- Ried, K., & Fakler, P. (2011). Protective effect of lycopene on serum cholesterol and blood pressure: Meta-analyses of intervention trials. *PubMed*, 68(4), 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2010.11.018>
- Rodriguez-Amaya, D. B. (1999). *A guide to carotenoid analysis in food*. DANE. (2024). *Boletín técnico del Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario*.
- Rulazi, E. L., Marwa, J., Kichonge, B., & Kivevele, T. T. (2024). Techno-economic analysis of a solar-assisted heat pump dryer for drying agricultural products. *Food Science & Nutrition*, 12, 952–970. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3810>
- Salehi, F. (2021). Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 546–555. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>
- Singh, A., Sarkar, J., & Sahoo, R. R. (2020). Experimental performance analysis of novel indirect-expansion solar-infrared assisted heat pump dryer for agricultural products. *Solar Energy*, 206(June), 907–917. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.065>
- Silva, Y. P. A., Ferreira, T. A. P. C., Celli, G. B., & Brooks, M. S. (2018). Optimization of Lycopene Extraction from Tomato Processing Waste Using an Eco-Friendly Ethyl Lactate–Ethyl Acetate Solvent: A Green Valorization Approach. *Waste Biomass Valorization*, 10, 2851–2861. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0317-7>
- Skiepkó, N., Chwastowska-Siwiecka, I., Kondratowicz, J., & Mikulski, D. (2016). Fatty acid profile, total cholesterol, vitamin content, and TBARS value of Turkey breast muscle cured with the addition of lycopene. *Poultry Science*, 95(5), 1182–1190. <https://doi.org/10.3382/ps/pew005>
- So, S., Uriyapongson, S., & Uriyapongson, J. (2020). Effects of dried tomato waste powder levels on lycopene content, lipid oxidation, color, antioxidant activity, and sensory properties of

- frankfurter sausage made from Thai native beef. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 42(1), 27–34. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2020.5>
- Souza, B., Oliván, M., Soldevilla, G., & Motilva, M.-J. (2023). A comparative evaluation of the phenol and lycopene content of tomato by-products subjected to different drying methods. *Food Science and Technology*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114644>
- Tan, S., Ke, Z., Chai, D., Miao, Y., Luo, K., & Li, W. (2021). Lycopene , polyphenols and antioxidant activities of three characteristic tomato cultivars subjected to two drying methods. *Food Chemistry*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128062>
- Tang, Y., Li, X., Xu, P., Yang, J., Zhang, Z., & Wang, R. (2025). Performance Evaluation of a Solar-Assisted Multistage Heat Pump Drying System Based on the Optimal Drying Conditions for *Solanum lycopersicum* L . *Foods*, 14(7), 1–21. <https://doi.org/10.3390/foods14071195>.
- Taşeri, L., Aktaş, M., Şevik, S., Gülcü, M., Uysal Seçkin, G., & Aktekeli, B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food Chemistry*, 260(March), 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.122>
- Tigcilema, C., Hernández, A., & Cardona, J. (2020). Revisión de Literatura: Importancia del licopeno, métodos de extracción y propuesta para la adición de tomate en polvo en jamón Virginia. *Https://Bdigital.Zamorano.Edu*, 120. <https://bdigital.zamorano.edu:80/jspui/handle/11036/6938%0Ahttps://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/2463>
- Topal, U., Sasaki, M., Goto, M., & Hayakawa, K. (2006). Extraction of lycopene from tomato skin with supercritical carbon dioxide: Effect of operating conditions and solubility analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(15), 5604–5610. <https://doi.org/10.1021/jf0606407>
- Vasapollo, G., Longo, L., Rescio, L., & Ciurlia, L. (2004). Innovate supercritical CO2 extraction of lycopene from tomato in the presence of vegetable oil as co-solvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, 29(1–2), 87–96. [https://doi.org/10.1016/S0896-8446\(03\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0896-8446(03)00039-1)
- Vallecilla-Yepes, L., & Ciftci, O. (2018). Increasing cis-lycopene content of the oleoresin from

tomato processing byproducts using supercritical carbon dioxide. *Food Science and Technology*, 95, 354–360. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.065>

Xia, H., Liu, C., Li, C. C., Fu, M., Takahashi, S., Hu, K. Q., Aizawa, K., Hiroyuki, S., Wu, G., Zhao, L., & Wang, X. D. (2018). Dietary tomato powder inhibits high-fat diet-promoted hepatocellular carcinoma with alteration of gut microbiota in mice lacking carotenoid cleavage enzymes. *Cancer Prevention Research*, 11(12), 797–810. <https://doi.org/10.1158/1940-6207.CAPR-18-0188>

Yahya, M., Fahmi, H., Hasibuan, R., & Fudholi, A. (2023). Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45(January), 102936. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936>

Zhang, Y., Zhu, G., Li, X., Zhao, Y., Lei, D., Ding, G., Ambrose, K., & Liu, Y. (2020). Combined medium- and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (*Luffa cylindrical*) slices. *Journal of Food Engineering*, 284(17), 110043. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110043>