



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación del Efecto de la Temperatura de Deshidratación Sobre la Capacidad Antioxidante y el Contenido de Metabolitos Antioxidantes en Hojas de *Moringa oleifera* e Incorporación en una Bebida Láctea

Santiago Zapata Giraldo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos
Medellín, Colombia
2022

Evaluación del Efecto de la Temperatura de Deshidratación Sobre la Capacidad Antioxidante y el Contenido de Metabolitos Antioxidantes en Hojas de *Moringa oleifera* e Incorporación en una Bebida Láctea

Santiago Zapata Giraldo

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Director:

Ph.D., M. Sc. Benjamín Alberto Rojano

Codirector:

M. Sc. Andrés Felipe Alzate Arbelaez

Línea de Profundización:

Productos Naturales y Antioxidantes

Grupo de Investigación:

Química de los Productos Naturales y los Alimentos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Posgrado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos

Medellín, Colombia

2022

(Dedicatoria o lema)

A Dios con mucho amor y gratitud.

*A mi familia por su apoyo invaluable, mis
padres Diana, Carlos y a mis hermanos.*

*A Ang por su gran apoyo, guía, amor y ser un
Angel para mí.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por todas sus incontables bendiciones, por darme la vida, mi familia y la oportunidad de conocer personas maravillosas que me han brindado su gran apoyo, con el cuál he podido crecer personal y profesionalmente; sin duda alguna sin su ayuda no hubiese podido concluir este trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por abrirme las puertas a una formación integral, con calidad y equidad. Por sus docentes con su conocimiento y enseñanza entre ellos Uriel Sepúlveda, Jesús Gil y Carlos Márquez; por los espacios para la realización de los experimentos y sus aulas, fuentes de constante aprendizaje.

Mis más sinceros y especiales agradecimientos al profesor Benjamín Rojano, por ser un gran maestro y amigo, por su ejemplo de fortaleza, superación de las adversidades, sus enseñanzas, consejos y apoyo en la dirección de este trabajo.

Infinitas gracias Al M. Sc. Andrés Felipe Alzate Arbeláez por la codirección de este trabajo, por su guía, sabios consejos, ser un ejemplo de disciplina y los invaluable aportes que me ha brindado tanto profesional como personalmente.

Doy también muchas gracias al Laboratorio Ciencia de los Alimentos y los integrantes activos o no, que han sido parte del grupo, especialmente con aquellos que he coincidido: Benjamín Rojano, Felipe Alzate y Karol Zapata a quienes admiro y agradezco profundamente; a Marcela Morales, Tania Jaimes, Stephania Rosales y Angie Vélez por su amistad incondicional y otros que han sido un fuerte apoyo al grupo como Víctor H. Borda, Jader A. Valle, Juan D. Montoya y Laura C. Rojas, un millón de gracias.

Finalmente, al Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia (MINCIENCIAS) por su apoyo mediante la convocatoria 891 de 2020: *“Vocaciones y formación en CTel para la reactivación económica en el marco de la postpandemia 2020”*.

Resumen

Evaluación del Efecto de la Temperatura de Deshidratación Sobre la Capacidad Antioxidante y el Contenido de Metabolitos Antioxidantes en Hojas de *Moringa oleífera* e Incorporación en una Bebida Láctea

Las hojas de *Moringa oleífera* son reconocidas por su elevado valor nutricional y de componentes bioactivos, sin embargo, son altamente perecederas debido a su alto contenido de humedad. El secado es un proceso que favorece la conservación, reduciendo la actividad de agua e inhibiendo las reacciones de deterioro asociadas a esta, pero puede ocasionar pérdidas en la calidad nutracéutica de las hojas. Por esto, la evaluación de diferentes tecnologías (térmicas y no térmicas) y los parámetros de secado es de importancia para obtener una mayor estabilidad, minimizando la pérdida de compuestos antioxidantes en las hojas de moringa. En este trabajo, se colectaron hojas de moringa frescas y fueron sometidas a cuatro métodos de secado: liofilización, solar, convectivo (40, 50, 60, 70 y 80 °C) y microondas (360, 540, 720 y 900 W). Las cinéticas de secado, el ajuste a modelos semi empíricos y otros parámetros fueron evaluados. Los metabolitos antioxidantes fueron cuantificados por el método de polifenoles totales y flavonoides, mientras que la capacidad antioxidante fue evaluada por los métodos ABTS y FRAP. Adicionalmente, se elaboró un producto en polvo a partir del extracto seco de Moringa y se empleó como suplemento en una bebida láctea. El modelo con mejor ajuste a las cinéticas de secado fue *Logistics* con valores de $0.9987 < R^2 < 0.9998$. El menor tiempo de secado fue obtenido con el uso de microondas a 900 W (2.7 min), presentando altos valores para la velocidad de secado (3.29 kg agua/kg materia seca*min) y la difusividad efectiva ($7.900 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Adicionalmente, el mayor contenido de polifenoles fue obtenido para las hojas frescas con un valor de $2357.48 \pm 95.02 \text{ mg EAG}/100\text{g BS}$, seguido de liofilización y 900 W con conservaciones del 98% y 76%, respectivamente, tendencia similar a la observada para flavonoides. Para los métodos de ABTS y FRAP, las hojas frescas registraron los mayores valores siendo 63934.97 y $15197.40 \text{ } \mu\text{mol ET}/100 \text{ g BS}$,

respectivamente, seguido de liofilización permitiendo una conservación del 81% y 95%. En el secado en microondas la mayor retención se presentó a 900 W, con valores de 72% y 82% para ABTS y FRAP respectivamente, para el secado convectivo no se presentaron diferencias significativas con la temperatura. El extracto seco con 5% de maltodextrina (MD) evidenció buenas características físicas y un alto contenido de polifenoles, que incorporado a una bebida láctea causó un aumento del 114% en la capacidad reductora FRAP (a 2 g/L), con respecto al control. Además, su incorporación mantuvo una muy buena aceptación sensorial de la bebida láctea, evidenciando un gran potencial para ser incluido en otras matrices alimenticias.

Palabras clave: *Lactosuero, extracto de moringa, cinéticas de secado, microondas, polifenoles*

Abstract

Evaluation of Temperature Effect of Drying on Antioxidant Capacity and Antioxidant Metabolites content of *Moringa oleifera* leaves and Incorporation into a Milk Drink

Moringa oleifera leaves are recognized for their high nutritional value and high bioactive components, however, they are highly perishable due to their high moisture content. Drying is a process that allows preservation, reducing water activity and inhibiting deleterious reactions associated with this, but could cause losses in leave's nutraceutical quality. For that, evaluating different drying technologies (thermal and non-thermal) and their parameters is important for obtaining a greater quality, and minimizing losses in antioxidant compounds of moringa leaves. In this work, fresh moringa leaves were collected and treated with four drying methods: lyophilization, sun-drying, convective (40, 50, 60, 70, and 80 °C), and microwave (360, 540, 720 y 900 W). Drying kinetics, semi-empirical model fitting, and other parameters were evaluated. Antioxidant metabolites were quantified by total polyphenols and flavonoid methods, and antioxidant capacity was evaluated by ABTS and FRAP methods. Additionally, a powder product was elaborated through moringa's dry extract and used as a milk drink supplement. The Logistics model presented the best fit for kinetics drying with $0.9987 < R^2 < 0.9998$ values. The shortest drying time was obtained by microwave at 900 W (2.7 min) presenting high values for drying velocity (3.29 kg water/kg dry matter*min) and effective diffusivity ($7.900 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Additionally, polyphenols' greater content was obtained for fresh leaves with a value of $2357.48 \pm 95.02 \text{ mg AGE}/100\text{g DB}$, followed by lyophilization and 900 W with preservation values of 98% and 76%, respectively, with a similar trend observed for flavonoids. For ABTS and FRAP methods, fresh leaves registered the highest values of 63934.97 and 15197.40 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g DB}$, respectively, followed by lyophilization, allowing the preservation of 81% and 95%. In microwave drying, the greater retention was presented at 900 W, with values of

72% and 82% for ABTS and FRAP, respectively, for convective drying significant differences were not presented with drying temperature. Dry extract with 5% maltodextrin (MD) showed good physical characteristics and a high polyphenols content, incorporated into a milk drink caused an increment of 114% in FRAP reduction capacity (with 2 g/L), concerning control. Also, its incorporation kept a very good milk drink's sensorial acceptation, showing great potential to be included in other food matrices.

Keywords: *Whey, moringa's extract, drying kinetics, microwave, polyphenols.*

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1. Marco teórico	5
1.1 Generalidades de la moringa	5
1.1.1 Clasificación taxonómica	7
1.1.2 Cultivo de la planta de <i>Moringa oleífera</i>	7
1.2 Deshidratación de materias primas vegetales	9
1.2.1 Mecanismos de secado.....	9
1.2.2 Parámetros que influyen en el secado por convección	11
1.2.3 Secado en microondas.....	13
1.2.4 Liofilización	16
1.3 Componentes nutricionales	18
1.3.1 Composición proximal	18
1.3.2 Minerales y vitaminas	18
1.3.3 Antioxidantes	19
1.3.4 Polifenoles	20
1.3.5 Flavonoides	21
2. Materiales y métodos	23
2.1 Material vegetal	23
2.2 Evaluación de los procesos de secado	23
2.2.1 Procesos de secado	23
2.2.2 Determinación de humedad	24
2.2.3 Evaluación del color	24
2.2.4 Ajustes a modelos matemáticos.....	25

XII Evaluación del Efecto de la Temperatura de Deshidratación Sobre la Capacidad Antioxidante y el Contenido de Metabolitos Antioxidantes en Hojas de *Moringa oleifera* e Incorporación en una Bebida Láctea

2.2.5	Cálculo de la difusividad efectiva	26
2.2.6	Cálculo de la energía de activación	27
2.3	Evaluación de la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes	27
2.3.1	Preparación de extractos para las evaluaciones	27
2.3.2	Determinación del contenido de polifenoles	27
2.3.3	Determinación del contenido de flavonoides	28
2.3.4	Capacidad antioxidante por el método del radical catiónico ABTS ⁺	28
2.3.5	Capacidad reductora por el método FRAP	29
2.3.6	Análisis estadístico.....	29
2.4	Aplicación en bebida láctea	29
2.4.1	Evaluación del solvente de extracción.....	29
2.4.2	Preparación del extracto seco.....	30
2.4.3	Preparación de la bebida láctea e incorporación del extracto	30
2.4.4	Prueba de aceptación sensorial.....	31
3.	Resultados y discusión	33
3.1	Evaluación de los procesos de secado.....	33
3.1.1	Contenido de humedad.....	33
3.1.2	Análisis de color	34
3.1.3	Cinética de secado.....	37
3.1.4	Ajuste a modelos de secado	40
3.1.5	Difusividad efectiva	44
3.1.6	Energía de activación.....	44
3.2	Efecto del secado sobre la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes	45
3.2.1	Extractos para la caracterización antioxidante	45
3.2.2	Evaluación del contenido de polifenoles	47
3.2.3	Evaluación del contenido de flavonoides	50
3.2.4	Evaluación de la capacidad antioxidante ABTS	53
3.2.5	Evaluación capacidad reductora FRAP	56
3.3	Obtención del extracto en polvo e incorporación en la bebida láctea.....	58
3.3.1	Evaluación del solvente de extracción.....	58
3.3.2	Preparación del extracto en polvo.....	60
3.3.3	Análisis antioxidante a la bebida láctea suplementada con extracto de moringa ...	63
3.3.4	Aceptación sensorial de la bebida láctea.....	64
	Conclusiones	67
	Bibliografía	69

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Esquema de las partes de <i>Moringa oleifera</i>	5
Figura 1-2. Usos de las diferentes partes de la planta de <i>Moringa oleifera</i>	6
Figura 1-3. Países con presencia de <i>Moringa oleifera (color violeta)</i>	8
Figura 1-4. Curva de secado típica de productos agrícolas	10
Figura 1-5. Esquema del calentamiento por mecanismo de rotación dipolar	14
Figura 1-6. Esquema del mecanismo de conducción iónica generado por microondas	15
Figura 1-7. Mecanismos de transferencia en el proceso de liofilización.....	17
Figura 1-8. Etapas del secado por liofilización.....	18
Figura 1-9. Mecanismo de oxidación de lípidos.....	20
Figura 1-10. Estructura de los principales flavonoides.....	21
Figura 1-11. Mecanismos antioxidantes de los flavonoides.....	22
Figura 3-1. Hojas frescas y deshidratadas mediante los diferentes tratamientos.....	35
Figura 3-2. Curvas para secado convectivo.....	37
Figura 3-3. Curvas de velocidad de secado vs. tiempo (procesos convectivos).....	38
Figura 3-4. Curvas de secado en microondas.....	39
Figura 3-5. Curvas de velocidad de secado vs. tiempo (procesos con microondas)	39
Figura 3-6. Extractos obtenidos de las hojas frescas (a) y después del secado convectivo.....	46
Figura 3-7. Extractos obtenidos de hojas frescas (a), después del secado en microondas.....	46
Figura 3-8. Efecto de la temperatura de secado en el contenido de polifenoles.....	48
Figura 3-9. Efecto de la potencia de secado en el contenido de polifenoles.....	48
Figura 3-10. Contenido de polifenoles en todos los procesos de secado evaluados.....	49
Figura 3-11. Efecto de la temperatura en el contenido de flavonoides.....	50
Figura 3-12. Efecto de la potencia de secado en el contenido de flavonoides.....	51
Figura 3-13. Contenido de flavonoides en todos los procesos de secado evaluados.....	52
Figura 3-14. Efecto de la temperatura en la capacidad antioxidante ABTS.....	53
Figura 3-15. Efecto de la potencia de secado en la capacidad antioxidante ABTS.....	54

XIV Evaluación del Efecto de la Temperatura de Deshidratación Sobre la Capacidad Antioxidante y el Contenido de Metabolitos Antioxidantes en Hojas de *Moringa oleífera* e Incorporación en una Bebida Láctea

Figura 3-16. Capacidad antioxidante en todos los procesos de secado evaluados.....	55
Figura 3-17. Efecto de la temperatura en la capacidad reductora FRAP.	56
Figura 3-18. Efecto de la potencia en la capacidad reductora FRAP.	57
Figura 3-19. Capacidad reductora en todos los procesos de secado evaluados.	58
Figura 3-20. Determinación del contenido de polifenoles para los extractos.	59
Figura 3-21. Determinación de la capacidad antioxidante ABTS para los extractos.....	60
Figura 3-22. Determinación de la capacidad reductora FRAP para los extractos.	60
Figura 3-23. Extractos secos con diferentes proporciones de maltodextrina.	61
Figura 3-24. Determinación del contenido de polifenoles para los extractos secos.....	62
Figura 3-25. Extracto deshidratado y en polvo de moringa.	62
Figura 3-26. Bebida láctea con incorporación del extracto en polvo.	63
Figura 3-27. Gráfico de red - evaluación sensorial	65

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Clasificación taxonómica de la <i>Moringa oleifera</i>	7
Tabla 1-2. Características ambientales para el cultivo de <i>Moringa oleifera</i>	8
Tabla 2-1. Ecuaciones de los modelos empleados para los ajustes.	26
Tabla 3-1. Contenido de humedad de las hojas frescas y sometidas a los procesos de secado ...	34
Tabla 3-2. Parámetros de color para las hojas frescas y deshidratadas.	36
Tabla 3-3. Resumen de los ajustes a modelos cinéticos para el secado convectivo.	41
Tabla 3-4. Resumen de los ajustes a modelos cinéticos para el secado con microondas.	43
Tabla 3-5. Valores de difusividad efectiva y energía de activación para los procesos de secado convectivo y microondas.	44
Tabla 3-6. Contenido de polifenoles y capacidad reductora bebida con extracto en polvo.	64
Tabla 3-7. Resultados evaluación sensorial bebida láctea.	65

Introducción

Moringa oleifera es conocida comúnmente como la planta milagrosa o árbol de la vida. Estos nombres son atribuidos debido a sus propiedades y usos, específicamente en los campos de la medicina y la nutrición. Es una planta nativa de la región norte de India, al sur de las montañas del Himalaya (Foidl et al., 2001). De las 13 especies pertenecientes a la familia Moringaceae, *M. oleifera* es la que más se cultiva y es excepcionalmente nutritiva con una gran variedad de usos (Tafesse et al., 2020).

Se ha encontrado que la mayor parte de esta puede aprovecharse. Por ejemplo, la madera se emplea en la industria textil y papelera, de la corteza se extrae una goma empleada para la extracción de taninos para el curtido de pieles, sus vainas o frutos son utilizados para consumo humano, en fresco o en una gran diversidad de preparaciones culinarias, estos son exportados frescos, refrigerados y/o enlatados a diversos lugares, especialmente donde existen comunidades hindúes. Las semillas son empleadas para la extracción de aceite, consumidas freídas o crudas, o para la disminución de la turbidez en agua (Liñan Tobias, 2010). Por otro lado, las hojas son usadas como forraje y como una fuente de alimento alternativo para combatir la desnutrición, especialmente en niños (Anwar et al., 2007).

Los recientes avances de las últimas décadas en la investigación nutricional han cambiado el entendimiento de los científicos de la contribución de las dietas vegetarianas a la salud humana. Los fitoquímicos, son compuestos bioactivos presentes en frutas, granos y otros alimentos vegetales, para los cuales su consumo ha sido relacionado con una reducción en el riesgo de padecer muchas enfermedades crónicas como cáncer, enfermedades cardiovasculares, hipertensión e infartos (A. Santos et al., 2012). Las frutas y vegetales contienen una amplia variedad de fitoquímicos antioxidantes como compuestos fenólicos y carotenoides que pueden ayudar a proteger los sistemas celulares del daño oxidativo y disminuir el riesgo de enfermedades crónicas. Muchas de las plantas medicinales que

fueron descubiertas en la antigüedad se encuentran en uso, incluso nuevas medicinas siguen siendo descubiertas en diversas plantas (Sreelatha & Padma, 2009).

En diversos estudios se evidencia que la planta *M. oleifera* es una fuente rica en sustancias bioactivas con efectos positivos en la salud humana como glucosinolatos, ácidos clorogénicos, flavonoles, compuestos fenólicos, tocoferoles, carotenoides, varios micro y macrominerales nutricionalmente importantes han sido también analizados en esta planta (Amaglo et al., 2010; Tiloke et al., 2018). Específicamente, en las hojas de esta planta se ha encontrado que su contenido de vitamina A es 4 veces mayor que en zanahorias, la vitamina C es 7 veces mayor que la encontrada en naranjas, posee 2 veces más potasio que el encontrado en bananas, más hierro que en la espinaca y más proteínas y calcio que los encontrados en leche y huevos (Madi et al., 2016). Muchos de los beneficios ya mencionados de *M. oleifera* sugieren que esta planta puede ser utilizada como un ingrediente funcional en la industria de los alimentos, incluso en muchas partes del mundo, el uso de esta planta como fortificante en alimentos de consumo masivo se encuentra en incremento y se ha estudiado su potencial para ser utilizado en distintos sectores de la industria, cárnicos, lácteos, panadería, bebidas para deportistas, entre otros (Oyeyinka & Oyeyinka, 2018).

La calidad de los productos nutraceúticos y suplementos alimenticios a base de compuestos naturales está fuertemente relacionada con la calidad de la materia prima vegetal utilizada. Entre los diversos factores que contribuyen a la calidad de las especias y hierbas, el secado es uno de ellos. Este proceso es empleado para su conservación, ya que las materias primas vegetales son consideradas alimentos altamente perecederos debido a su alto contenido de humedad, aproximadamente entre 75% – 85% (Pirbalouti et al., 2017). El secado es uno de los métodos más antiguos empleados para la conservación de alimentos (Mujumdar, 2014), este proceso permite disminuir la actividad de agua favoreciendo la preservación, al reducir la velocidad de las reacciones asociadas al deterioro del alimento, como el crecimiento de microorganismos, reacciones enzimáticas, reacciones de pardeamiento y oxidación de componentes (Caccavale et al., 2016). Adicional a la extensión del periodo de vida útil de los alimentos, el proceso de secado permite obtener mejoras en los costos y en la logística asociada a las etapas de empaque, transporte y distribución; al reducir el volumen de almacenamiento (Kaleta et al., 2013). El secado de las hojas de las plantas es realizado ya sea por métodos naturales o

tecnológicos. El secado natural es una de las prácticas más comúnmente adoptada por muchos de los productores en países en desarrollo (Abdullah et al., 2012), sin embargo, por ser en un ambiente abierto presenta mayores retos en el control de las condiciones de higiene en la producción y también presenta largos tiempos de secado lo que limita su capacidad de producción para cubrir la demanda creciente de estos productos (Liu et al., 2018).

Por otra parte, durante el procesamiento se pueden presentar cambios físicos y químicos indeseables entre los cuales se incluye pérdida de componentes volátiles, degradación de compuestos de interés como antioxidantes y nutrientes, pardeamiento y cambios de color, afectando las propiedades características de las diferentes hojas secas e incluso disminuyendo la aceptabilidad general de los consumidores (Babiker et al., 2016), por ejemplo, a temperaturas mayores de 50 °C se han reportado pérdidas mayores al 50% de los componentes antioxidantes, 19% en el nivel de proteína y entre 63% a 85% en los niveles de vitaminas (Glover-Amengor & Mensah, 2012). Lo anterior, es fuertemente influenciado por la tecnología empleada para el secado y las condiciones bajo las cuales se desarrolla la operación. Dev et al., (2011) realizaron un estudio de secado del fruto de *M. oleifera* a tres diferentes temperaturas, 50°C, 60°C y 70 °C, empleando dos diferentes tecnologías, secado convectivo con aire caliente y secado convectivo asistido por microondas con una potencia de 1 W/g. En este estudio se evaluaron algunos atributos correspondientes a la calidad del fruto, color, relación de rehidratación y compuestos volátiles, tanto fresco como después del tratamiento de deshidratación, encontrando que el secado de las muestras con la asistencia de microondas fue cinco veces más rápido que sin la asistencia de este, resultando en una reducción de 80% en el tiempo de secado y permitiendo reducir la pérdida de componentes volátiles e incrementando la preservación de la mayoría de componentes bioactivos, comparado al método convencional por aire caliente.

La selección del método y las condiciones apropiadas de secado son de gran importancia para minimizar la pérdida de nutrientes y deterioro de la calidad durante esta operación. Por otro lado, pese a que se encuentran algunos estudios en los que se relaciona el secado y temperatura en las hojas de Moringa con algunos parámetros nutricionales y sensoriales, en la literatura son escasos los estudios que evalúen la relación de diferentes tecnologías de deshidratación con el efecto en la capacidad antioxidante en este material. Así, se

evidencia que es necesario llevar a cabo estudios que permitan conocer el efecto de diversas variables de secado como temperatura y tecnología empleada con miras a determinar la idoneidad de un proceso industrial que permita una mayor conservación de las propiedades antioxidantes en este producto.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de diversos métodos de deshidratación sobre la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes en hojas de *Moringa oleifera* y su incorporación en una bebida láctea

Objetivos específicos

- Realizar una caracterización nutracéutica de hojas de *M. oleifera* producidas en la subregión Occidente del departamento de Antioquia.
- Evaluar el efecto de la deshidratación por medio de diferentes tecnologías sobre la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes en hojas de *M. oleifera*.
- Determinar las propiedades antioxidantes y la aceptación sensorial de una bebida láctea preparada con un extracto de hojas secas y en polvo de *M. oleifera*.

1. Marco teórico

1.1 Generalidades de la moringa

La *Moringa oleífera* es una especie originaria del continente asiático, que se ha ido propagando a otros lugares tropicales del mundo (Mallenakuppe et al., 2019). La planta se caracteriza por tener hojas pinnadas de aproximadamente 60 cm, que se dividen en folíolos y se ubican sobre el raquis. El fruto tiene forma de vaina trivalvada y puede llegar a medir, en su época de madurez, entre 10 y 50 cm. Además, las semillas presentan tres alas de color beige y un centro duro de color café, su tamaño se encuentra entre 1.5 a 3 cm (Olson & Fahey, 2011). En la Figura 1-1 se muestra un esquema que detalla las partes de la planta. De manera general, el árbol de moringa puede alcanzar alturas entre 5 a 10 metros (Mallenakuppe et al., 2019).

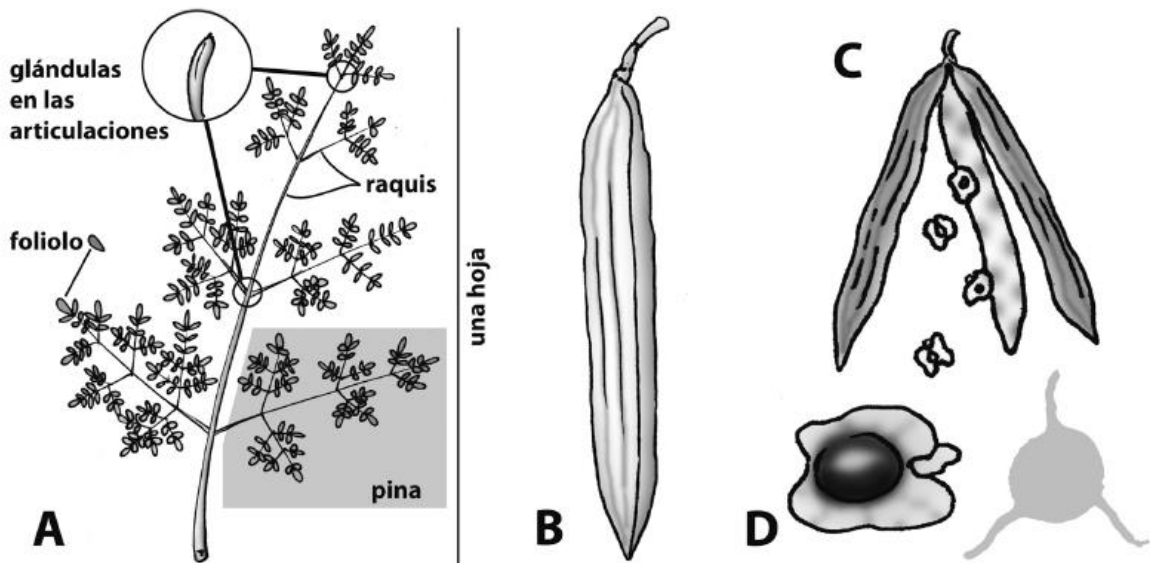


Figura 1-1. Esquema de las partes de *Moringa oleifera*. A, hojas grandes pinnadas. B, Fruto. C, Fruto abierto. D, semillas. Tomado de Olson & Fahey, 2011.

El árbol de moringa se reconoce por su alto contenido nutricional, siendo así que presenta un porcentaje aproximado de 30% en peso de proteínas y se ha encontrado que es asimilable la mayor cantidad de ellas. Además, contiene todos los aminoácidos esenciales y en proporciones similares a las presentes en la composición del cuerpo humano (Olson & Fahey, 2011), por ende, se ha considerado emplearlo como forraje para animales y para alimentación humana (Nouman et al., 2014). Por otro lado, también se ha identificado la presencia de fitoquímicos en las hojas, a los cuales se les atribuyen la capacidad de subsanar una gran variedad de enfermedades con el consumo de moringa, como lo son: asma, hiperglucemia, gripe, dolores de cabeza, reducción de los niveles de colesterol y presión arterial (Udikala et al., 2017). Las semillas por su parte se han estudiado tanto para el tratamiento de aguas como para la producción de biodiesel (Biswas et al., 2016; Castro Márquez, 2013). La planta ha sido identificada también como potenciador de crecimiento de otros cultivos, debido a la presencia de zeatina en sus hojas (Biswas et al., 2016; Gandji et al., 2018). En la Figura 1-2, se observan la diversidad de usos que se han dado del tratamiento de cada parte de la *Moringa oleifera*.

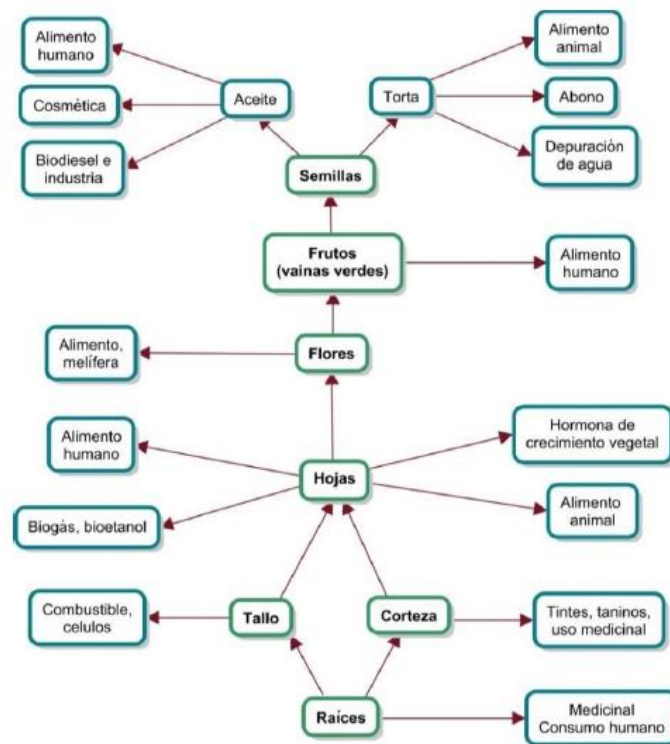


Figura 1-2. Usos de las diferentes partes de la planta de *Moringa oleifera*. Tomado de Lozano-Castellanos, 2019.

1.1.1 Clasificación taxonómica

La familia Moringaceae contiene sólo el género de la moringa, en el cual se han registrado hasta el momento 13 especies, siendo la más popular la *Moringa oleífera*. En la Tabla 1-1 se presenta la clasificación taxonómica

Tabla 1-1. Clasificación taxonómica de la *Moringa oleífera*. Tomado de Udikala et al., 2017.

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
Superdivisión	Spermatophyta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Dilleniidae
Orden	Brassicales
Familia	Moringaceae
Género	<i>Moringa</i>
Especie	<i>oleífera</i>

1.1.2 Cultivo de la planta de *Moringa oleífera*

El cultivo de la planta de *Moringa oleífera* puede darse en diversas zonas tropicales del mundo, como se representa en la

Figura 1-3 con los países en color violeta, algunos de estos lugares son el sur y el este de Asia, gran parte de África y en la zona céntrica de América hasta Brasil (Gandji et al., 2018). A pesar de la presencia de este árbol en diversos lugares, no se ha encontrado evidencia que lo catalogue como una especie invasiva, es decir, que pueda crecer de manera descontrolada afectando el ecosistema (Olson & Fahey, 2011). Por otra parte, las plantaciones de moringa se reconocen por tolerar condiciones poco favorecedoras, es decir con poca presencia de agua. Esto debido a que las raíces penetran profundamente la tierra, con lo cual pueden mejorar la forma de obtener los nutrientes y el agua necesaria para su crecimiento (Mallenakuppe et al., 2019; Nouman et al., 2014) siendo así, que los cultivos requieren de poco cuidado. Adicionalmente, debido a su capacidad de rápido

crecimiento y rebrote después de una cosecha es un cultivo beneficioso considerando los diversos usos que presenta (Nouman et al., 2014).

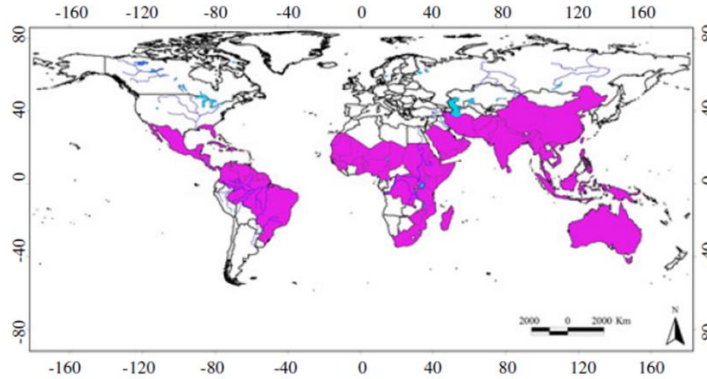


Figura 1-3. Países con presencia de *Moringa oleifera* (color violeta). Tomado de Gandji et al., 2018.

La moringa es una planta que se adapta a gran variedad de suelos, siendo los suelos franco-arenosos y ligeramente alcalinos los considerados como más adecuados, puesto que presentan un buen drenaje. Los suelos que sufren inundaciones son desfavorables para el crecimiento de la planta, ya que las raíces se descomponen en condiciones de anegamiento (Nouman et al., 2014). En la Tabla 1-2, se muestran otras condiciones necesarias para el cultivo de la planta. En cuanto a Colombia, las regiones Caribe y Andina se identifican como lugares potenciales para el cultivo; debido a que cuentan con las características medioambientales para el crecimiento adecuado de la planta (Castro Márquez, 2013).

Tabla 1-2. Características ambientales para el cultivo de *Moringa oleifera*. Tomado de Mallenakuppe et al., 2019.

Parámetro	Requerimiento/ Rango
Clima	Tropical y subtropical
Altitud	0-2000 metros
Temperatura	18.7°C - 28.5 °C
Pluviosidad	250 mm - 2000 mm
Tipo de suelo	Franco, arenoso o una composición de ambos
pH	5 - 9

1.2 Deshidratación de materias primas vegetales

El secado es uno de los métodos más antiguos empleados para la conservación de alimentos (Mujumdar, 2014). Este proceso favorece la preservación al disminuir la actividad de agua, ocasionando a su vez una reducción en la velocidad de las reacciones asociadas al deterioro del alimento, como las reacciones enzimáticas, de pardeamiento y de oxidación de componentes y generando además, una barrera que inhibitoria del crecimiento de microorganismos (Caccavale et al., 2016). Adicional a la extensión del periodo de vida útil, el proceso de secado permite obtener mejoras en los costos y en la logística asociada a las etapas de empaque, transporte y distribución; al reducir el volumen de almacenamiento (Kaleta et al., 2013).

Las hojas verdes al igual que las frutas y vegetales frescos, tienen una alta tendencia a perecer rápidamente después de la cosecha, debido a su alto contenido de agua, causando grandes pérdidas postcosecha. Además, algunas de estas materias primas vegetales no se encuentran disponibles en cantidad suficiente durante todo el año, debido a que la mayoría de sus producciones son estacionales (Naikwade, 2015). El alto contenido de humedad en las hojas debe ser reducido con el objetivo de prevenir las reacciones de deterioro (Ramsumair et al., 2014), reduciendo cerca de un 85% de su peso durante el secado. Por otra parte, durante el procesamiento se pueden presentar cambios físicos y químicos indeseables que afectan las propiedades características de las hojas e incluso disminuyen su aceptabilidad general. Entre estos procesos de deterioro se incluyen la pérdida de componentes volátiles, pardeamiento, cambio de color y la degradación de sustancias bioactivas y nutrientes (Babiker et al., 2016). Por lo tanto, la selección de la tecnología y condiciones apropiadas de secado son de gran importancia para minimizar la pérdida de nutrientes y deterioro de la calidad durante el secado.

1.2.1 Mecanismos de secado

Los procesos de secado involucran inicialmente la remoción del agua libre superficial, seguida del agua ligada desde el interior del alimento, hasta que se alcanza un determinado límite. Los mecanismos de secado en los alimentos incluyen la difusión superficial, difusión de vapor y líquido, además, de la acción capilar en las regiones porosas de la matriz alimentaria (Erbay & Icier, 2010). La Figura 1-4 representa una curva de secado típica para materias primas agrícolas, en esta se describe la velocidad de

secado y la temperatura como una función del tiempo, lo cual puede ser usado en la identificación del mecanismo dominante durante el secado de un producto (Onwude et al., 2016). En el periodo inicial del secado, la temperatura de equilibrio del aire es usualmente mayor que la temperatura del producto (Carrín & Crapiste, 2008). Por lo tanto, la velocidad de secado entre A y B incrementa a medida que aumenta la temperatura del producto, hasta que la superficie de este se equilibra térmicamente con el aire, correspondiente a la región entre B a C.

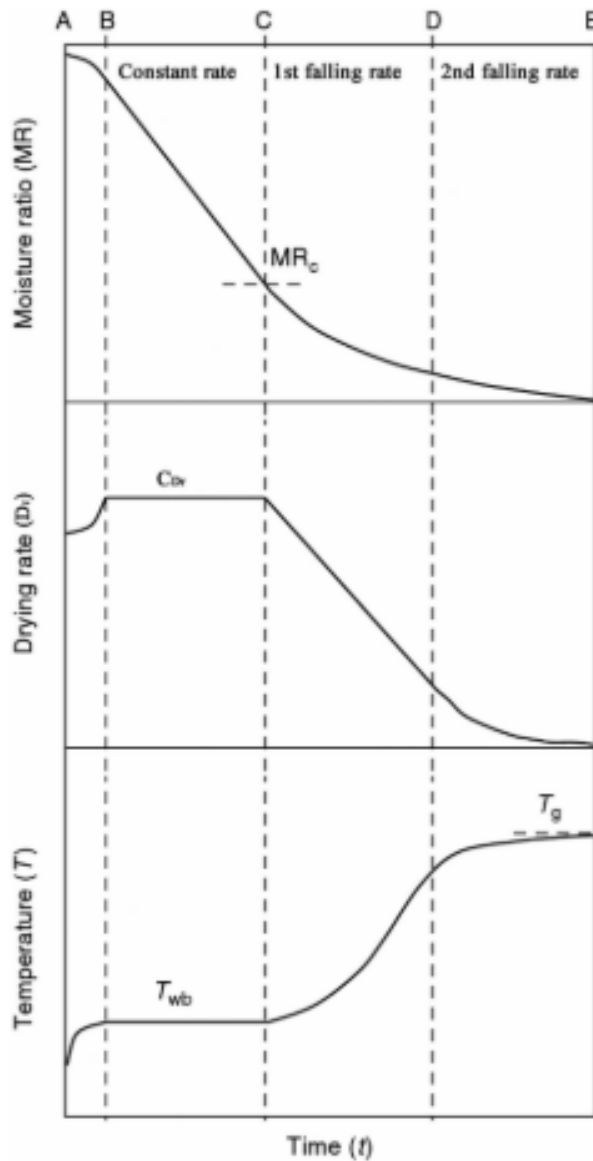


Figura 1-4. Curva de secado típica de productos agrícolas
Tomada de: Onwude et al., 2016.

Bajo condiciones constantes de operación, los procesos de secado de materias primas agrícolas y biológicas han sido descritos como un conjunto de pasos que consisten en un periodo inicial de velocidad de secado constante (B a C), durante el cual, el secado ocurre como si fuera la evaporación de agua pura, es decir, agua que no se encuentra ligada por enlaces químicos al material vegetal. Este periodo puede no ser observado en el secado de hojas, ya que su contenido de humedad libre es insignificante (Nourhène et al., 2008). Principalmente, el proceso de secado de hojas ocurre durante los periodos de disminución de la velocidad de secado (C a E), ya que son controlados por los mecanismos de difusión, la velocidad de secado disminuye debido a que la humedad dentro de la hoja es lentamente transportada hacia la superficie antes de que se dé su evaporación. Bajo esta condición la difusión y el efecto capilar controlan las velocidades reducidas del proceso. La cantidad de humedad removida durante este periodo es pequeña, pero el tiempo empleado es considerablemente alto y por ende es el factor controlante del proceso de secado global. La velocidad de secado es un parámetro que depende de condiciones de la materia vegetal como: la geometría, dimensiones y composición química; y de condiciones externas como temperatura, humedad relativa y la tasa de flujo de aire (Shinde et al., 2013).

1.2.2 Parámetros que influyen en el secado por convección

El uso de parámetros inapropiados durante el secado de las hojas resulta en pérdida de calidad y de nutrientes durante el proceso. Por lo tanto, los diferentes tipos de hojas requieren condiciones de operación específicas que permitan obtener la calidad consistente requerida en el producto final. En esta sección se describirá cómo los parámetros afectan el secado de las hojas y qué condiciones deben ser controladas durante el proceso para alcanzar la humedad y calidad deseadas al final del proceso.

Condiciones climáticas

La velocidad a la cual el agua se evapora al secarse al aire libre depende de las condiciones climáticas del ambiente. Tanto la temperatura del aire, humedad relativa y la velocidad del viento varían dependiendo de la localización geográfica y la época del año. En una condición climática caliente y seca, las hojas expuestas se secan en unos pocos días debido a la rápida evaporación del agua. Por otro lado, el secado puede tardar un mayor tiempo en un clima húmedo, con bajo movimiento de aire o de menor temperatura. El efecto de las condiciones climáticas será predominante en los métodos de secado

naturales como secado solar, en sombra y por viento (Nasri & Belhamri, 2018). En los secadores mecánicos como bombas de calor y deshidratadores de bandejas, el consumo energético será generalmente menor si se encuentra en un ambiente con condiciones secas, debido a que se reduce la energía extra requerida para la deshumidificación del aire atmosférico (Şevik, 2014).

Temperatura de secado del aire

A medida que la temperatura de bulbo seco del aire en la entrada incrementa, la humedad relativa disminuye y la fuerza impulsora del secado aumenta, debido a que se da un aumento en la capacidad de retención del agua en el aire y así permite la aceleración de la velocidad de difusión de la humedad a través de los materiales que componen la hoja (Bensebia & Allia, 2015).

Las temperaturas comunes empleadas para el secado de hojas se han encontrado en el rango desde 40 °C hasta 70 °C, encontrándose que un secado con temperaturas de 50 °C – 60 °C es factible para la deshidratación de un gran número de plantas medicinales (Rocha et al., 2011). Sin embargo, a mayores temperaturas los cambios físicos, químicos, estructurales y nutricionales que afectan los atributos de calidad de los alimentos como color, sabor, composición de ingredientes activos y textura durante los procesos de secado también son incrementados, esto es debido a la volatilización de compuestos de bajo peso molecular y aumento en las cinéticas de las reacciones de degradación como la pérdida de clorofila y carotenoides (Ataei et al., 2015; Onwude et al., 2017). Por otro lado, aire húmedo a bajas temperaturas puede favorecer la degradación, acelerando la actividad enzimática de las mismas hojas o incluso creando una atmosfera propicia para el ataque microbiano y disminuyendo la velocidad de secado (Jeni et al., 2010). Por lo anterior, es importante optimizar y seleccionar cuidadosamente la temperatura de secado para obtener un producto con una calidad consistente.

▪ Humedad relativa

La humedad relativa y la temperatura del aire en la entrada y salida del proceso de secado están interrelacionadas con el agua que capta el aire y la humedad del producto en el secado. La humedad relativa del aire es la cantidad de agua que contiene el aire con respecto a la máxima que puede contener a esa temperatura. Entre mayor sea el

contenido de humedad del aire (alta humedad relativa), menor será la velocidad a la cuál puede evaporar agua (Tzempelikos et al., 2014). La humedad relativa puede ser disminuida aumentando la temperatura de bulbo seco del aire favoreciendo la velocidad de secado, pero a su vez esto también permitirá una mayor pérdida de calidad (Ju et al., 2016), por lo tanto este es un parámetro que debe tenerse en cuenta en la optimización de los procesos de deshidratación (Pu et al., 2016).

- **Velocidad de flujo de aire**

El tiempo de secado y la calidad del producto depende de la velocidad de circulación del aire y su uniformidad. A una alta velocidad de aire, la cantidad de este que se encuentra cerca de la superficie y ha retirado humedad del producto es continuamente reemplazado por aire fresco con baja humedad relativa, el cuál es muy eficiente en la remoción de humedad (Putra & Ajiwiguna, 2017). Bajo condiciones constantes de temperatura y humedad relativa del aire de entrada, la máxima velocidad de secado es obtenida mediante la mayor circulación de aire a través de la superficie del producto (Mukhopadhyay & Siebenmorgen, 2018). Sin embargo, una velocidad de aire muy alta puede arrastrar las hojas fuera de las bandejas o de los lugares de secado, lo cuál sería una desventaja. Además, la baja efectividad de la transferencia de calor externa no es un problema si la difusión interna del agua es la principal limitante durante el proceso de secado (Premi et al., 2012).

Generalmente, una alta temperatura, baja humedad relativa, y alta velocidad de aire son necesarios para un secado más rápido, mientras que se asegure que la calidad del producto esté lo menos comprometida posible (Erbay & Icier, 2009; Karimi et al., 2012).

1.2.3 Secado en microondas

Las ondas electromagnéticas que se encuentran en una frecuencia entre 300 MHz- 300 GHz son llamadas microondas (Feng et al., 2012). Estas han sido estudiadas en los últimos años principalmente por su capacidad de calentar diferentes materiales, ya que las microondas actúan directamente sobre el material generando un calentamiento volumétrico (Bélanger et al., 2008). Adicionalmente, durante la incidencia de la radiación sobre los materiales, se genera un aumento de la presión de vapor interna que permite la salida del agua desde la matriz hasta el exterior (Zhang et al., 2006). En el caso particular

del secado de alimentos, que utiliza comúnmente dos frecuencias 915 MHz y 2450 MHz (Mello et al., 2014), se reconocen dos mecanismos predominantes, la rotación dipolar y la conducción iónica, las cuales se describen a continuación.

Rotación dipolar

Este mecanismo es predominante sobre materiales que pueden generar dipolos al estar expuestos a un campo eléctrico (Mishra & Sharma, 2016). La influencia de dicho campo ocasiona una rotación de las moléculas con dipolos para alinearse con este y seguidamente cuando el campo es detenido, se da un retorno al estado de desorden denominado tiempo de relajación. En este momento, es donde la energía térmica es generada por la fricción entre las moléculas, en un microondas trabajando a 2450 MHz ocurre 4.9×10^9 veces por segundo el ciclo de alineamiento y desorden, con lo cual se da un rápido calentamiento volumétrico de la matriz sólida (Mello et al., 2014). En este mecanismo, a medida que aumenta la temperatura se da una disminución de la viscosidad y por ende de la fricción entre las moléculas, ocasionando que la eficiencia de la conversión de energía eléctrica a energía térmica disminuya (C. Kumar & Karim, 2019). En la Figura 1-5 se muestra un diagrama del mecanismo descrito.

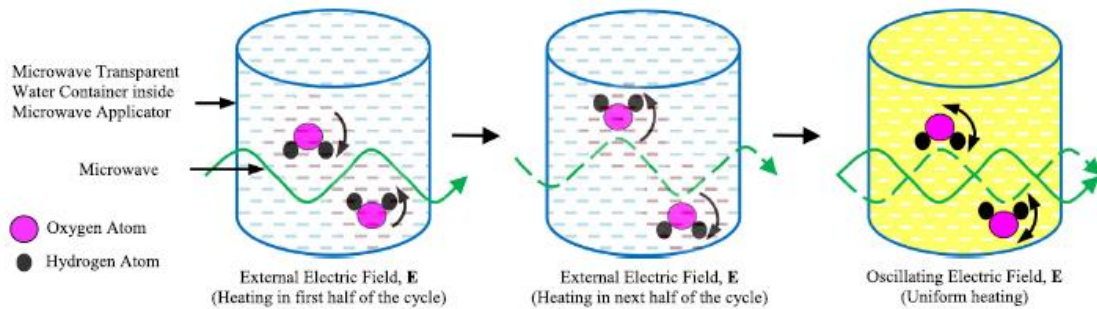


Figura 1-5. Esquema del calentamiento por mecanismo de rotación dipolar Tomada de Mishra & Sharma, 2016.

▪ Conducción iónica

Consiste en la interacción que presentan los iones presentes en los materiales con las microondas, en el cual se produce un movimiento de las cargas al estar en contacto con el campo eléctrico oscilante. El aumento de la temperatura dentro de la matriz es ocasionado por la resistencia que generan las demás especies de la solución al flujo de estos iones. Con el paso del tiempo el flujo de iones sigue en aumento al igual que la

temperatura, por ende, se produce un efecto continuo. En el calentamiento influyen dos parámetros: la concentración del ion y la movilidad dentro de la solución. Adicionalmente, esta última depende del tamaño, la carga, la conductividad y la temperatura del medio (Mello et al., 2014). En la Figura 1-6, se observa la organización de los iones por la influencia de las microondas.

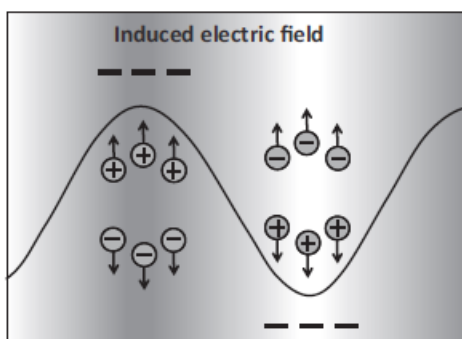


Figura 1-6. Esquema del mecanismo de conducción iónica generado por microondas
Tomado de: Mello et al., 2014.

En el secado por microondas, las propiedades dieléctricas de los materiales son de gran importancia para conocer la respuesta del material al campo eléctrico. Para describir este fenómeno se reconocen dos parámetros: la constante dieléctrica que representa la habilidad de un material para ser polarizado por un campo eléctrico almacenando energía dentro de él, y el factor de pérdida dieléctrica que permite conocer cuanta energía electromagnética es absorbida y luego convertida en calor. La relación entre ambos parámetros se denomina el factor de disipación y sugiere la capacidad de cada material de convertir la energía electromagnética en calor (Chandrasekaran et al., 2013). Adicionalmente, la profundidad de penetración de las microondas es otro parámetro importante, ya que una corta penetración dará una absorción de las microondas solo en la capa externa del material (Meda et al., 2017).

Este método de secado ha sido presentado como una alternativa que permite superar las limitaciones de velocidad de evaporación de agua en otros procesos. El secado en microondas permite acortar significativamente los tiempos de procesamiento como consecuencia de las siguientes ventajas: **i)** ajuste del nivel de absorción de energía automáticamente por la cantidad de agua en los productos, **ii)** posibilidad de un calentamiento selectivo de porciones en el interior y efecto de enfoque de las microondas,

iii) rápida disipación de energía a través del material, iv) una relativa menor migración de los constituyentes hidrosolubles, v) menores temperaturas en el producto en combinación con vacío y vi) un secado más eficiente en el periodo de disminución de la velocidad (Das et al., 2009; Mujumdar & Law, 2010; Zhang et al., 2006).

1.2.4 Liofilización

La técnica de liofilización es un método de secado en el cual se sublima el agua presente dentro de los materiales (Nireesha et al., 2013). El proceso consiste principalmente en enfriamiento de la muestra, secado primario y secado secundario (Shukla, 2011):

Enfriamiento

Inicialmente se enfría la muestra a una presión constante para que el agua dentro de la matriz se congele. Dentro de esta etapa se da la formación de cristales, los cuales están directamente relacionados con la velocidad de secado, puesto que a mayor tamaño de estos más fácilmente se podrá dar la sublimación del agua. Para lograr este tipo de cristales, se lleva a cabo un congelamiento lento o un proceso de templado (“*annealing*”). Este último, hace referencia a ciclos de subir y bajar la temperatura (Hatch & de Silva, 2013). Sin embargo, en aplicaciones biotecnológicas y de alimentos el tamaño de los cristales puede afectar la estructura del material de interés. Las temperaturas usadas en las cámaras de refrigeración se encuentran entre -50 °C y -80 °C (Shukla, 2011).

Secado primario

Esta etapa inicia con la reducción de la presión por debajo de la atmosférica, llevando al sistema a condiciones de vacío. Adicionalmente, se suministra cierta cantidad de calor, con lo cual es posible generar un ambiente para la sublimación del agua (Nail et al., 2002). El gradiente de presión generado por un espacio de alta y baja presión es la fuerza impulsora para la remoción de agua. En esta fase pasa a estado gaseoso aproximadamente el 95% del agua que puede ser retirada de la matriz (Bhatta et al., 2020). Los mecanismos de transferencia de calor son principalmente por conducción y radiación, un esquema que ejemplifica dichos fenómenos se muestra en la Figura 1-7.

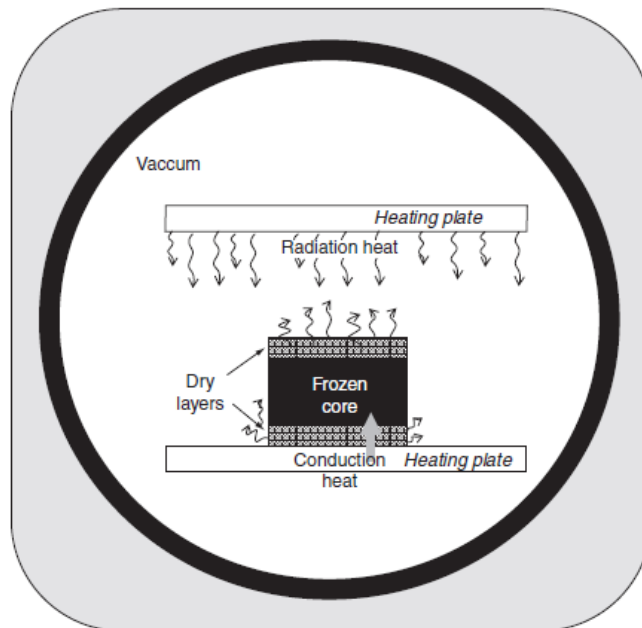


Figura 1-7. Mecanismos de transferencia en el proceso de liofilización.
Tomado de Hatch & de Silva, 2013.

- **Secado secundario**

Tiene como objetivo la eliminación del agua que está en estado líquido, dado que los cristales de agua son eliminados en el secado primario. En esta etapa se eleva la temperatura más que en la fase anterior, pero debe ser inferior a la temperatura de almacenamiento (Hatch & de Silva, 2013). Lo anterior, con el fin de romper las interacciones fisicoquímicas que se hayan formado entre las moléculas de agua y el material congelado. El mecanismo predominante para la remoción del agua es la difusión desde los poros hasta el exterior del material, pasando desde una región de alta concentración del soluto a una de baja concentración (Nail et al., 2002). En la Figura 1-8 se observa una recopilación de todas las etapas y el comportamiento de la temperatura y la presión en cada una.

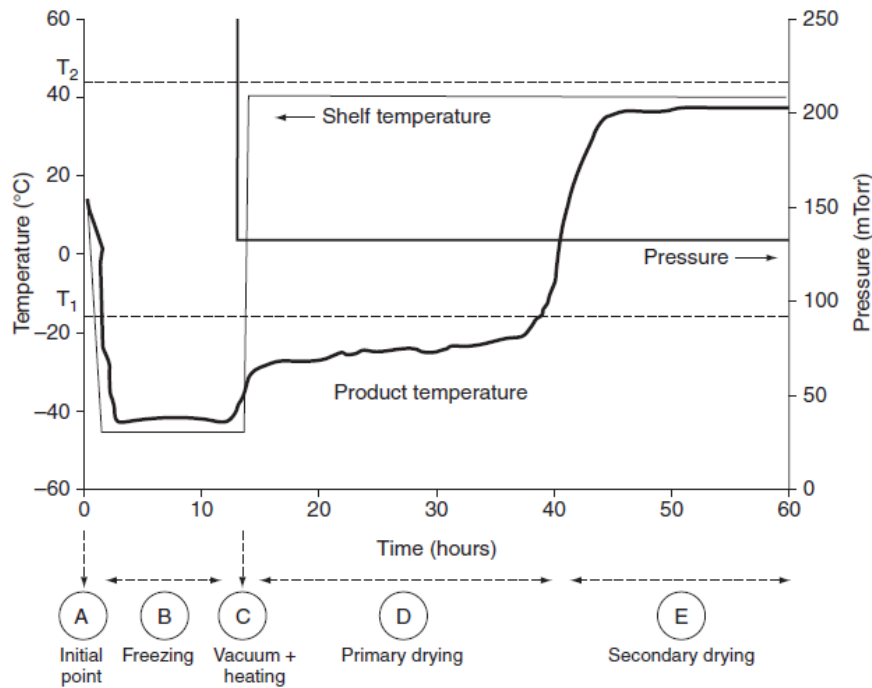


Figura 1-8. Etapas del secado por liofilización.
Tomado de: Hatch & de Silva, 2013.

1.3 Componentes nutricionales

1.3.1 Composición proximal

La composición proximal de los alimentos es un término usualmente usado para hacer referencia a las cantidades relativas de proteína, lípidos, agua, ceniza y carbohidratos en alguna muestra y es un importante indicador de la calidad nutricional de los alimentos (Thangaraj, 2016).

1.3.2 Minerales y vitaminas

Los minerales y las vitaminas son nutrientes esenciales que necesitan los organismos para funcionar adecuadamente. Tienen muchas funciones en el metabolismo intermedio y en el metabolismo especializado en órganos específicos. Las vitaminas son generalmente convertidas en el cuerpo en moléculas más complejas que funcionan como coenzimas, estas no pueden ser sintetizadas por el cuerpo humano y deben ser provistas en la dieta. Las vitaminas se clasifican principalmente en hidrosolubles y liposolubles. Mientras que las

vitaminas hidrosolubles (vitaminas del complejo B y vitamina C) son fácilmente absorbidas, las liposolubles requieren de la presencia de bilis o lipasa pancreática para su absorción (Costa-Pinto & Gantner, 2020). Una ingesta insuficiente de vitaminas da lugar a una variedad de síndromes de deficiencia, que incluyen ceguera nocturna (deficiencia de vitamina A), beriberi y neuritis (deficiencia de vitamina B1), escorbuto (deficiencia de vitamina C), raquitismo (deficiencia de vitamina D) y diátesis hemorrágica (deficiencia de vitamina K) (Ng et al., 2020).

1.3.3 Antioxidantes

En términos generales, los antioxidantes pueden ser definidos como sustancias que cuando están presentes en los alimentos, retardan, controlan o inhiben la oxidación y el deterioro de la calidad del alimento. En el cuerpo, los antioxidantes reducen el riesgo de enfermedades degenerativas causadas por el estrés oxidativo (Shahidi, 2015). Los alimentos son sistemas heterogéneos formados principalmente por agua, polisacáridos, proteínas y lípidos, siendo más susceptibles al deterioro oxidativos los dos últimos. El daño oxidativo lleva a una consecuente pérdida de las características organolépticas y nutricionales de los productos, motivo por el cual la industria busca protegerlos del oxígeno, usando envases herméticos, así como con la adición de agentes antioxidantes (Yildiz et al., 2001). Los lípidos son los sustratos más fácilmente oxidables en un alimento, ya que sufren reacciones de autooxidación (Ganiari et al., 2017). La Figura 1-9 muestra esquemáticamente como sucede el mecanismo de oxidación de lípidos, este tipo de reacción recibe el nombre de peroxidación lipídica, y afecta muchas de las propiedades del alimento como el aroma, color, sabor, cambios de textura y principalmente la disminución de valor nutricional por el daño en los ácidos grasos y algunas vitaminas liposolubles o precursores como la provitamina A, (Retinol, Retinaldehído, y Ácido Retinoico); la vitamina E, (Tocoferoles, Tocotrienoles), la vitamina K, (Naftoquinonas como la acetomenaftona, la fitomenadiona (K1), el menadiol, la menadiona y la menatetrenona (K4), y la Vitamina D, (Ergocalciferol) (Domínguez et al., 2019).

En las últimas décadas, ha aumentado el interés por los antioxidantes naturales, , ya que estos además de proteger los alimentos de un daño causado por el oxígeno y la autooxidación de lípidos, también han contribuido positivamente en mantener en equilibrio el estado redox una vez ingresan al cuerpo humano (Gulcin, 2020).

Iniciación	RH	→	R• + H•	Radical libre
Propagación	R• + O ₂	→	ROO•	Radical hidropéroxido
	ROO• + RH	→	R• + ROOH	Hidropéroxido
Terminación	R• + R•	→	RR	Compuestos muy estables
	R• + ROO•	→	ROOR	
	ROO• + ROO• +	→	ROOR + O ₂	
	RO• + R•	→	ROR	
	2RO• + 2ROO•	→	2ROOR + O ₂	

RH: Ácido graso insaturado.

Figura 1-9. Mecanismo de oxidación de lípidos.
Adaptada de Domínguez et al., 2019.

1.3.4 Polifenoles

Los compuestos fenólicos o polifenoles son considerados metabolitos secundarios de las plantas, necesarios para el crecimiento y desarrollo de estas. Se caracterizan por poseer diferentes estructuras químicas y actividad, centrándose su ubicación en el interior de las células y en la pared celular (Manach et al., 2004).

El término compuestos fenólicos engloba a todas aquellas sustancias que poseen uno o más anillos aromáticos con uno o más grupos hidroxilo. En función del número de sustituciones, se clasifican como monofenoles, difenoles y polifenoles. La actividad antioxidante de estos compuestos está asociada con sus estructuras químicas, las cuales tienen la capacidad de donar los protones del grupo hidroxilo fenólico (Cory et al., 2018), así como de deslocalizar y estabilizar electrones desapareados por resonancia en el anillo aromático. Además, poseen un bajo potencial de oxidación, alta capacidad de quelación de metales y una gran estabilidad y baja reactividad en su forma oxidada (Lakey-Beitia et al., 2020).

Por este motivo, entre sus funciones, cabe destacar la reducción de especies reactivas del oxígeno (ERO's) como el radical superóxido (O₂^{•-}), el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el radical hidroxilo (OH[•]), así como sustancias oxidadas altamente reactivas, como los radicales peroxilo (ROO[•]) (Losada-Barreiro & Bravo-Díaz, 2017).

1.3.5 Flavonoides

Los flavonoides son una importante clase de productos naturales con estructura fenólica, procedentes del metabolismo secundario de las plantas y presentes en: raíces, tallos, cortezas, flores, hojas y frutos. También son ampliamente encontrados en alimentos y bebidas como frutas, vegetales, te, cacao y vino (Kumar & Pandey, 2013). Los flavonoides presentan una diversa variedad de actividades biológicas, en las plantas son responsables del color y aroma de las flores, y en los frutos favorecen la atracción de polinizadores que contribuyen a la propagación de la especie (Griesbach, 2010).

La estructura de los flavonoides está compuesta por dos anillos bencénicos (A y B) los cuales están unidos a un anillo heterocíclico que contiene oxígeno (C). Los flavonoides pueden ser divididos en diferentes subclases dependiendo de la posición del enlace entre los anillos B y C, la estructura del anillo B y los patrones de hidroxilación y glicosilación de los tres anillos (Maleki et al., 2019) como se presenta en la Figura 1-10.

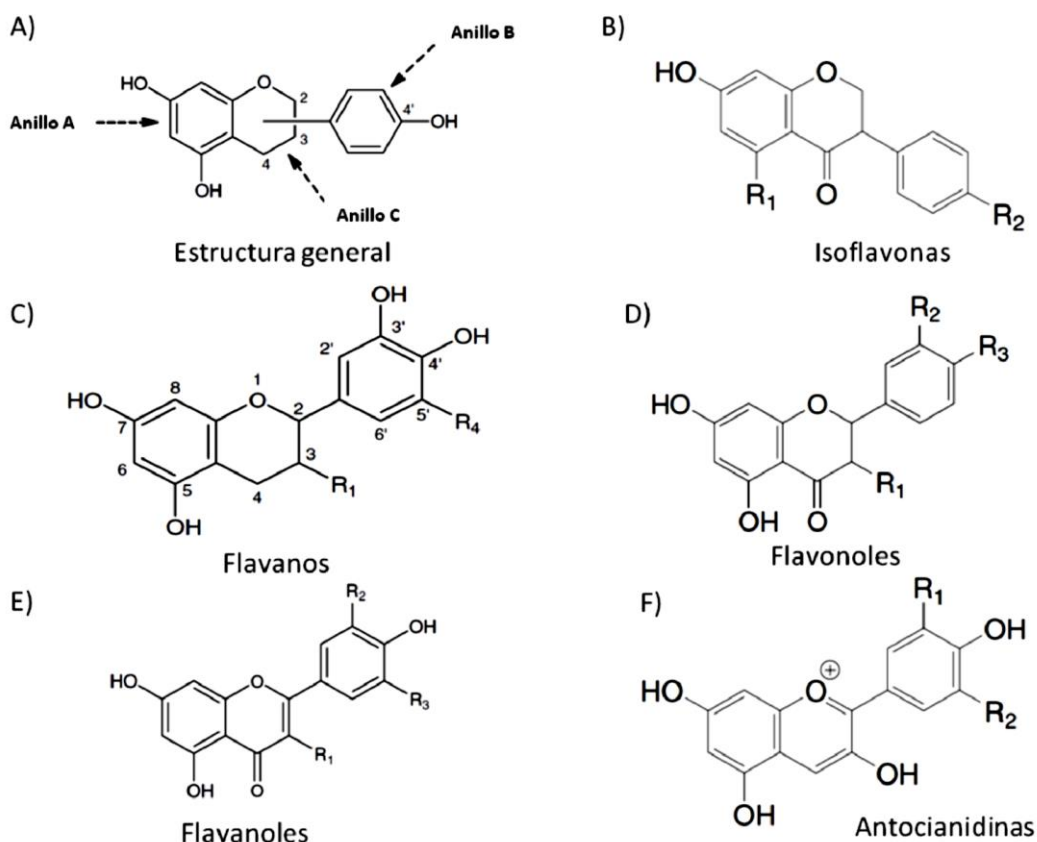


Figura 1-10. Estructura de los principales flavonoides.
Tomada de Limon et al., 2010.

Los flavonoides están asociados con un amplio espectro de efectos promotores de la salud, los cuales son atribuidos a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatoria, anti-mutagénica y anti-carcinogénica acopladas con su capacidad de modulación de enzimas celulares claves (LeJeune et al., 2015; Maleki et al., 2019; Panche et al., 2016; Srivastava & Bezwada, 2015; Ullah et al., 2020).

Los flavonoides pueden prevenir las lesiones causadas por los radicales libres mediante varias vías y una de estas es el atrapamiento directo de los radicales. Los flavonoides son oxidados por las especies radicalarias, resultando en un radical con menor reactividad (Panche et al., 2016). Otro mecanismo antioxidante que emplean los flavonoides es la capacidad de quelación de iones metálicos, los iones metálicos libres (hierro, cobre, etc.) favorecen la formación de Especies Reactivas de Oxígeno (EROs) mediante la reducción de peróxido de hidrógeno y la generación de un radical hidroxilo altamente reactivo, así los flavonoides al atrapar estos metales libres inhiben la formación de EROs. Además, debido a su bajo potencial redox (2.13 – 1.0 V), los flavonoides (FI-OH) son termodinámicamente capaces de reducir radicales libres altamente oxidantes como los radicales peroxilo, alcoxi e hidroxilo mediante la donación de un átomo de hidrógeno (Kumar & Pandey, 2013). Los anteriores mecanismos antioxidantes se presentan en la Figura 1-11.

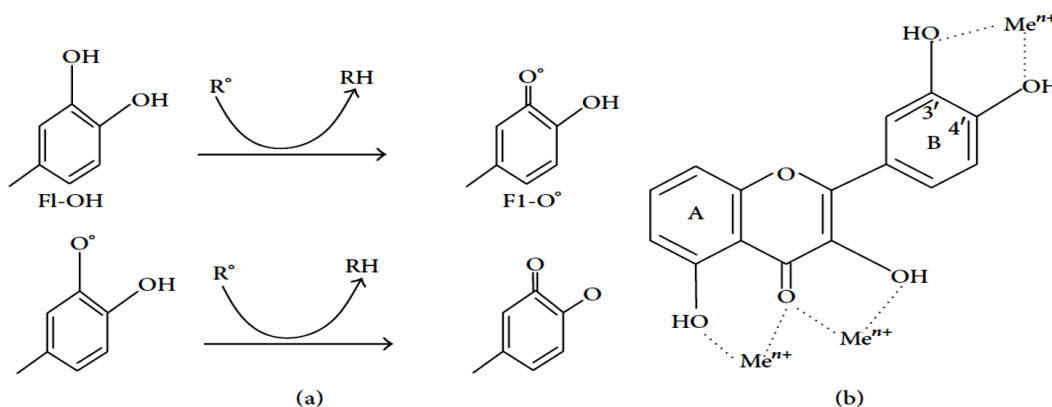


Figura 1-11. Mecanismos antioxidantes de los flavonoides
 a) atrapamiento de EROs (R°) y b) sitios de enlace para los metales libres (Me^{n+}).
 Tomado de Kumar & Pandey, 2013

2. Materiales y métodos

2.1 Material vegetal

Las hojas frescas de moringa fueron obtenidas de cultivos ubicados en el corregimiento de San Nicolas de Barí (Sopetrán, Antioquia; 6° 28' 40" N, 75° 49' 15" O), con una altitud y temperatura promedio de 480 msnm y 35 °C, respectivamente. Las hojas fueron clasificadas manualmente luego de la cosecha y aquellas con indicios de enfermedades o de daño físico fueron descartadas. Las hojas seleccionadas fueron adecuadamente higienizadas con agua corriente del grifo para la eliminación de la suciedad superficial y almacenadas en bolsas de plástico transparente microperforadas bajo condiciones de refrigeración (4 °C) para su posterior procesamiento.

2.2 Evaluación de los procesos de secado

2.2.1 Procesos de secado

Las hojas fueron sometidas a tres diferentes métodos de secado térmicos (solar, por aire caliente y microondas) y uno no térmico (liofilización). Para los métodos térmicos las hojas fueron esparcidas con una densidad de carga de 1.4 kg de hojas frescas/m² de área de secado. En el secado solar las hojas se dejaron durante tres días sobre una superficie abierta a la radiación solar con cerca de 27 h de luz al día y una temperatura promedio de 35 °C. El secado por aire caliente se realizó en un horno de bandejas eléctrico (Memmert UF750, Alemania) y se evaluaron cinco temperaturas de secado registrando el peso en diferentes intervalos (40, 50, 60, 70 y 80 °C; cada 30, 20, 10, 9 y 6 min, respectivamente) hasta obtener una diferencia de peso menor al 5% con respecto al dato anterior. Para el secado con microondas (Haceb serie Assento HM 1.1, Colombia) se evaluaron cuatro módulos de amplitud del pulso del magnetrón que genera las microondas (2450 MHz) con potencias equivalentes a 360, 540, 720 y 900 W. Para la elaboración de las curvas de secado se registró el peso cada 60, 40, 25 y 20 s, respectivamente con cada una de las

potencias anteriores, hasta obtener una diferencia de peso menor al 3% con respecto al dato anterior. La disminución en los intervalos de medición para las curvas de secado se realizó con base en experimentos previos y con el objetivo de obtener al menos siete puntos experimentales en cada condición evaluada. Para el proceso de liofilización, las hojas fueron empacadas en frascos plásticos de polipropileno, congeladas a -20 ± 1 °C durante 24 h. Las muestras congeladas fueron secadas durante dos días en el liofilizador (Labconco, USA). Se realizaron tres réplicas de cada proceso de secado. Las muestras secas fueron almacenadas a temperatura ambiente (22 ± 5 °C) en bolsas zip-lock de polietileno (Ziploc, Sc Johnson, Racine, WI, USA) hasta los posteriores análisis.

2.2.2 Determinación de humedad

El contenido de humedad fue determinado a las hojas frescas y posterior a los procesos de secado, se siguió la metodología para la determinación de sólidos totales en frutas y vegetales propuesta por AOAC 925.10 (2005). Se realizó la evaluación gravimétrica, sometiendo las muestras a 105 °C en un horno de secado hasta obtener un peso constante, cada medición fue realizada por triplicado.

2.2.3 Evaluación del color

La Evaluación de los parámetros de color se realizó a partir de las coordenadas L^* a^* b^* del espacio CIELAB mediante un colorímetro modelo RGB-1002, equipado con una sonda óptica marca LT-Lutron®, (Taiwan). Siendo L^* la coordenada para luminosidad, variando desde 0 a 100 (0 representa el color negro y 100 el blanco), a^* mide el verde cuando es negativo y el rojo cuando es positivo y b^* mide el azul al ser negativo y amarillo cuando es positivo (Ali et al., 2014).

Los valores numéricos de L^* , a^* y b^* fueron usados para obtener el cambio total de color (ΔE), el cuál es una medida de la diferencia de color entre las hojas de moringa frescas y secas. El cambio de color fue calculado mediante la Ecuación (2.1) para evaluar el efecto de los tratamientos de secado en la retención del color (Amini et al., 2022).

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (2.1)$$

Donde L_0^* , a_0^* , a_0^* son los valores de color para las hojas frescas y L^* , a^* , b^* , son los valores de color después del secado.

2.2.4 Ajustes a modelos matemáticos

La descripción del comportamiento de la cinética de secado se realizó a partir del contenido de humedad en base seca con la Ecuación (2.2), donde W_t es la masa en un tiempo t y W_s es la masa seca de las muestras deshidratadas obtenidas en el secado en bandejas y por microondas.

$$M_t = \frac{W_t - W_s}{W_s} \quad (2.2)$$

La relación de humedad adimensional (MR) se calculó con la Ecuación (2.3), donde M_t , M_e y M_o son el contenido de humedad en un tiempo t , el contenido de humedad en equilibrio y el contenido de humedad inicial en base seca, respectivamente. Los datos de MR obtenidos se graficaron respecto al tiempo, con el fin de obtener las curvas de secado experimentales.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2.3)$$

Se eligieron 5 modelos semi empíricos para el ajuste de las curvas de secado por microondas y en bandejas a partir de los reportados en la literatura para diferentes materiales vegetales (Potisate et al., 2015; Śledź et al., 2013), los cuáles son: *Page*, *Henderson & Pabis*, *Newton*, *Two terms exponential*, *Logistics* y *Midilli et al.*, que se muestran en la Tabla 2-1. El ajuste de los modelos fue realizado en el software MATLAB R2022a empleando la aplicación *Curve Fitter* y fueron evaluados mediante el cálculo del coeficiente de determinación R^2 , la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) y la suma de cuadrados de los errores (*SSE*), seleccionando los modelos con mejor ajuste a partir de valores altos para R^2 y bajos tanto para *RMSE* como para *SSE*.

Tabla 2-1. Ecuaciones de los modelos empleados para los ajustes.

Modelo	Ecuación
Page	$MR = e^{-k \cdot t^n}$
Henderson & Pabis	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t}$
Newton	$MR = e^{-k \cdot t}$
<i>Two terms exponential</i>	$MR = a \cdot e^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$
<i>Logistics</i>	$MR = \frac{b}{1 + a \cdot e^{k \cdot t}}$
<i>Midilli et al.</i>	$MR = a \cdot e^{-kt^n} + b \cdot t$

2.2.5 Cálculo de la difusividad efectiva

A partir de la forma simplificada de la segunda ley de Fick para placa plana, se realizó el cálculo de la difusividad efectiva mediante la Ecuación (2.4), donde D_{eff} es la difusividad efectiva y L es el espesor de la hoja correspondiente a 0.5 mm (Puttalingappa et al., 2022). Esta simplificación considera las siguientes suposiciones: la distribución inicial de la humedad en el material es uniforme, la resistencia externa a la difusión es despreciable, el valor de difusividad es constante y no se considera la contracción del material vegetal (Doymaz, 2017; Crank, 1975).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} * \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (2.4)$$

Posteriormente, se linealizó la Ecuación (2.4), aplicando logaritmo natural en ambos lados de esta y se graficó $\ln(MR)$ vs. tiempo de secado, luego la pendiente obtenida fue relacionada con la difusividad a partir de la Ecuación (2.5).

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (2.5)$$

2.2.6 Cálculo de la energía de activación

Para el cálculo de la energía de activación se utilizó la ley de Arrhenius que relaciona la difusividad efectiva con la potencia del microondas (Ecuación (2.6)), donde D_0 es la constante de Arrhenius (m^2/s), E_a es la energía de activación (W/g), m es la masa de la muestra (g), P la potencia de las microondas (W) (Fang et al., 2009).

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{-E_a m}{P}} \quad (2.6)$$

En el caso del secado en bandejas se relaciona la difusividad con la temperatura en la Ecuación (2.7), siendo E_a la energía de activación (J/mol), R la constante universal de los gases ($8.314 J/mol \cdot K$) y T la temperatura de secado ($^{\circ}C$). Seguidamente se graficó $\ln(D_{eff})$ vs. (m/P) para el caso del secado en microondas y $\ln(D_{eff})$ vs. $(1/T)$ para el caso de la deshidratación en bandejas. Con la pendiente obtenida de la regresión en ambos casos se obtuvo la energía de activación (Puttalingappa et al., 2022).

$$D_{eff} = D_0 e^{\frac{-E_a}{R(T+273.15)}} \quad (2.7)$$

2.3 Evaluación de la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes

2.3.1 Preparación de extractos para las evaluaciones

Para el extracto a partir de hojas frescas, se pesó aproximadamente 8 g de hojas y para las hojas deshidratadas, aproximadamente 1.2 g. Se adicionaron 80 mL de solvente etanol: agua (80:20), luego se homogenizó en ultraturax (IKA-Werk, Alemania) a 10000 rpm durante 45 s, la fase líquida fue recuperada mediante filtración, envasada en un recipiente ámbar, rotulada y almacenada a $-20^{\circ}C$ hasta los posteriores análisis.

2.3.2 Determinación del contenido de polifenoles

La determinación del contenido de polifenoles totales se realizó mediante el método colorimétrico de *Folin-Ciocalteu* descrito por Singleton & Rossi (1965) con algunas modificaciones. Brevemente, sobre el pozo de reacción se adicionaron 15 μL de una

dilución adecuada del extracto preparado, 37 μL del reactivo de *Folin–Ciocalteu* y 128 μL de agua tipo I, a los cinco minutos se adicionó 120 μL de carbonato de sodio (7.1 % p/v) y se registró la absorbancia en un espectrofotómetro a 760 nm luego de 1 h de reacción. La curva de calibración se construyó con ácido gálico como patrón estándar, el ensayo fue realizado por triplicado para cada muestra y los resultados fueron expresados como mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de muestra en base seca (mg EAG/100 g BS).

2.3.3 Determinación del contenido de flavonoides

El contenido de flavonoides fue determinado mediante el método colorimétrico del cloruro de aluminio propuesto por Marinova et al. (2005) con algunas modificaciones. 30 μL de muestra fueron mezclados con 15 μL de nitrito de sodio (NaNO_2) al 5% (p/v), 15 μL de tricloruro de aluminio (AlCl_3) al 10 % (p/v), 60 μL de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M y se ajustó el volumen con agua tipo I hasta 300 μL , la lectura espectrofotométrica se realizó a 510 nm luego de 6 min de reacción. La curva de calibración se realizó empleando (+) catequina como estándar, el ensayo fue realizado por triplicado para cada muestra y los resultados se expresaron como mg equivalentes de catequina por 100 g de muestra en base seca (mg EC/100 g BS).

2.3.4 Capacidad antioxidante por el método del radical catiónico ABTS⁺

Se empleó el método propuesto por Re et al. (1999) con algunas modificaciones. 15 μL de muestra se añadieron a 275 μL de una solución acuosa de ABTS⁺ a pH 7,4. La capacidad de las muestras para atrapar el radical ABTS⁺ se determinó mediante el valor de inhibición luego de 30 min de reacción, calculado como la relación de la absorbancia de la muestra a 734 nm con respecto a la del solvente de las muestras a la misma longitud de onda. La curva de calibración se realizó empleando Trolox como estándar, el ensayo fue realizado por triplicado para cada una de las muestras y los resultados se expresaron como valores TEAC, μmol equivalentes de Trolox por 100 g de muestra en base seca ($\mu\text{mol ET}/100\text{ g BS}$).

2.3.5 Capacidad reductora por el método FRAP

La capacidad reductora fue evaluada mediante el ensayo FRAP, basado en la reducción del ion férrico (Fe^{3+}) acomplejado con TPTZ a su forma ferrosa (Fe^{2+}) que presenta un máximo de absorbancia a 590 nm. El procedimiento seguido fue el propuesto por Benzie (1996), con algunas modificaciones. El reactivo FRAP contenía 2.5 mL de TPTZ 10 μ M en HCl 40 mM, 25 mL de solución buffer acetato 0.3 μ M a pH 3.6 y 2.5 mL de $FeCl_3$ 20 μ M. Un volumen de 50 μ L de muestra fue mezclado con 950 μ L de reactivo FRAP y la absorbancia fue medida a 590 nm (Zapata et al., 2015). La curva de calibración se construyó con Trolox como patrón estándar, el ensayo fue realizado por triplicado para cada muestra y los resultados fueron expresados como μ mol equivalentes de Trolox por 100 g de muestra en base seca (μ mol ET/ 100 g BS).

2.3.6 Análisis estadístico

Las pruebas de deshidratación fueron realizadas por triplicado, similar a cada una de las determinaciones realizadas, los resultados se presentan como el valor promedio y desviación estándar. El análisis estadístico se realizó con el software R, mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y se empleó la prueba de la Diferencia Significativa Honesta (DSH) de Tukey para la comparación de medias con un nivel de significancia del 95%, considerando diferencias significativas con un valor $p < 0.05$ (Nanda et al., 2021).

2.4 Aplicación en bebida láctea

2.4.1 Evaluación del solvente de extracción

Se realizó la evaluación de ocho diferentes solventes para la extracción de los componentes antioxidantes: i) etanol, ii) agua, iii) mezcla de etanol y agua (80:20), iv) mezcla de etanol y propilenglicol (80:20), v) mezcla de etanol y glicerina (80:20), vi) mezcla de etanol y polietilenglicol (80:20), vii) mezcla de etanol y triacetina (80:20) y viii) mezcla de etanol y agua (50:50). Los extractos se realizaron en una proporción 1:10 de hojas deshidratadas a solvente y se mantuvieron en agitación a 130 rpm durante 45 min con una temperatura de 45°C. Después de obtenido el extracto se filtró y se evaluó el sobrenadante,

los análisis que se realizaron fueron determinación de polifenoles totales, capacidad reductora por el método FRAP y capacidad antioxidante por el método ABTS.

2.4.2 Preparación del extracto seco

El extracto que presentó mayor capacidad antioxidante fue concentrado mediante destilación con un rotavapor a 55°C y presión reducida. Posteriormente, el extracto fue dividido en cuatro partes iguales y a cada una se le adiciono maltodextrina (MD) (10 - 12 equivalentes de dextrosa (ED)) en diferentes concentraciones: 0% (control), 2.5%, 5% y 10%. Luego se homogenizo cada mezcla empleando un ultraturrax durante 40 s y se secó en un horno de bandejas a 45°C. A los productos secos obtenidos se les realizo la determinación de polifenoles totales y fueron almacenados a temperatura ambiente en un frasco de vidrio y protegidos de la luz directa.

2.4.3 Preparación de la bebida láctea e incorporación del extracto

La bebida láctea fue elaborada siguiendo el procedimiento descrito por Castells et al. (2017) empleando 50% de suero dulce y 50% de leche. Se realizó un lote de 40 kg de bebida, mezclando 20 kg de suero dulce (termizado el día anterior a 61°C durante 4 min) y 20 kg de leche entera. Se llevo la mezcla a un precalentamiento de 45°C y se adicionaron los ingredientes sólidos bajo agitación constante: 0.1% de una mezcla comercial de hidrocoloides compuesta de goma guar, carragenina y pectina como estabilizantes, 0.5% de almidón modificado y 0.2% de citrato de sodio con el objetivo de mejorar la estabilidad de las proteínas del suero durante el tratamiento térmico. Se realizó el proceso de homogenización a 1500 psi y pasteurización a 85°C durante 30 min, posteriormente, la mezcla fue enfriada a 43°C y se realizó la inoculación con cultivos de fermentos comerciales de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*, se dejó incubando durante 4 h, tiempo en el que se obtuvo un valor 0.55% de acidez, expresada como equivalentes de ácido láctico.

Finalmente, se llevó a refrigeración a 6.5°C durante la noche, se adicionó sacarosa al 8.5% y se incorporó el extracto en polvo de moringa obtenido con maltodextrina al 5% a cinco diferentes concentraciones: 0.5 g/L, 1.0 g/L, 1.5 g/L, 2.0 g/L y un control, sin la adición del extracto, estos fueron roturados y almacenados en refrigeración a 4 ± 1°C. Las

determinaciones del contenido de polifenoles y capacidad reductora FRAP se realizaron a los cinco días posteriores a la aplicación del extracto en polvo, para cada una de las concentraciones evaluadas.

2.4.4 Prueba de aceptación sensorial

La evaluación sensorial se realizó para la bebida láctea control y en la que se incorporó el extracto de moringa en polvo a 1.0 g/L. Se empleó una escala hedónica de 7 puntos que fue sometida a un panel evaluador no entrenado (67 participantes). 20 mL de cada muestra fueron entregados en recipientes idénticos, codificados con números aleatorios de 3 dígitos y presentados al mismo tiempo en posiciones aleatorias. Los atributos valorados por los panelistas fueron: color, olor, sabor, textura, acidez y aceptabilidad general; donde las categorías evaluadas con sus respectivos puntajes fueron: “me disgusta en extremo” = 1, “me disgusta mucho” = 2, “me disgusta un poco” = 3, no me disgusta ni me disgusta” = 4, “me gusta un poco” = 5, “me gusta mucho” = 6 y “me gusta en extremo” = 7.

3.Resultados y discusión

3.1 Evaluación de los procesos de secado

3.1.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad en los alimentos es un parámetro importante que influye en sus propiedades coligativas, reológicas, de textura y en las reacciones físicas, químicas, enzimáticas y microbiológicas que ocurren en estos. Aunque un alto contenido de agua es necesario para los organismos vivos, no es deseable con respecto a la conservación de alimentos, pues favorece el deterioro microbiano y otros procesos de degradación no microbiológicos que ocurren durante el almacenamiento (Damodaran & Parkin, 2017). El contenido de humedad en los vegetales frescos y las hierbas es usualmente 75-85% y estos niveles de agua necesitan ser reducidos a menos del 15% para su conservación (Pirbalouti et al., 2017).

El contenido de humedad de las hojas de moringa frescas fue de $76.98\% \pm 0.87\%$, el cuál es un valor usual para este tipo de productos agrícolas, sin embargo, este alto valor favorece las reacciones de deterioro físico, químico, microbiológico y enzimático en estas, causando así una baja estabilidad y grandes pérdidas postcosecha (Orphanides et al., 2016). Este valor de humedad obtenido es cercano al presentado por McBurney et al. (2004) de 75% y superior al obtenido por Dania et al. (2018) equivalente a $70.04\% \pm 0.01\%$. Los resultados obtenidos para la determinación de humedad para las hojas frescas y sometidas a los diversos procesos de secado se presentan en la Tabla 3-1.

Por lo anterior, es justificable realizar un proceso de deshidratación que permita extender la vida útil de esta matriz alimenticia, para ello se evaluaron diversos procesos de secado: solar, convectivo, microondas y liofilización. Los valores de humedad más bajos se obtuvieron para los métodos de secado convectivo a 80°C ($5.82\% \pm 0.46\%$) y secado por

microondas a 900 W (5.86 % \pm 0.36 %), siendo estos los tratamientos con mayor energía asociada en cada caso. Por otro lado, el secado a 40°C presentó la menor remoción de agua del material vegetal, encontrándose diferencias significativas con respecto a los otros métodos. En cada uno de los procesos de deshidratación se obtuvieron valores de porcentaje de humedad inferiores al 10 %, los cuales son adecuados para el fin de obtener una mayor estabilidad y conservación de las hojas de moringa durante el almacenamiento y el desarrollo de la cadena logística (Dev et al., 2011). Estos contenidos de humedad final alcanzados son comparables con los reportados por Saini et al. (2014) de 6.5 % para hojas de moringa deshidratadas mediante secado solar, convectivo, por liofilización y microondas, al igual que para los obtenidos por Shivanna & Subban (2014) para hojas de Curry (*Murraya koenigii* L. Spreng), siendo de 6.1 % \pm 0.6 %, 6.4% \pm 0.9 % y 5.1 % \pm 0.3 %, mediante deshidratación por microondas a 595 W, liofilización y por aire caliente a 50°C, respectivamente.

Tabla 3-1. Contenido de humedad de las hojas frescas y sometidas a los procesos de secado

Nombre		Porcentaje Humedad (%)	Desviación estándar (%)
Hojas frescas		76.98 ^a	0.87
Secado convectivo	40°C	8.75 ^b	0.80
	50°C	6.80 ^{cd}	0.48
	60°C	6.38 ^{cd}	0.20
	70°C	6.06 ^{cd}	0.42
	80°C	5.82 ^d	0.46
Secado en microondas	360 W	6.42 ^{cd}	0.29
	540 W	6.31 ^{cd}	0.27
	720 W	5.93 ^{cd}	0.25
	900 W	5.86 ^d	0.36
Liofilización		7.24 ^c	0.05
Secado solar		6.44 ^{cd}	0.31

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones. Los valores en la misma columna con la misma letra no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

3.1.2 Análisis de color

Los análisis de color en materiales alimenticios son empleados como un método alternativo para evaluar variaciones en la calidad, debido a que estos son generalmente realizados

más rápidamente que un análisis fisicoquímico (Ali et al., 2014). El color en los alimentos es uno de los factores más importantes que influyen la preferencia de los consumidores, un alimento con un color objetable o desagradable se encuentra asociado con deterioro y el producto será probablemente rechazado (Zeece, 2020). En la Figura 3-1 se muestran imágenes de las hojas frescas y obtenidas mediante los diferentes tratamientos de secado evaluados. Además, los parámetros de color para las coordenadas del espacio CIELAB y el cambio de color (ΔE) para estos tratamientos, son presentados en la Tabla 3-2.

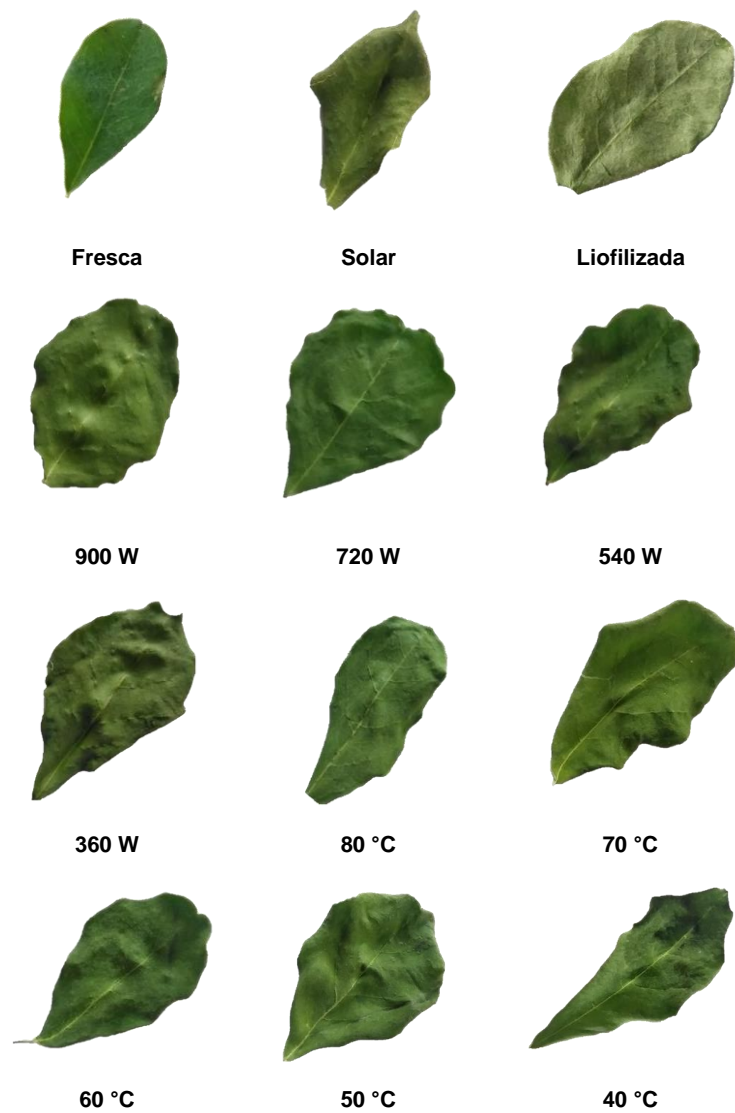


Figura 3-1. Hojas frescas y deshidratadas mediante los diferentes tratamientos.

Las hojas frescas de moringa presentaron valores de 37.33, -26.00 y 33.33 para L^* , a^* y b^* , respectivamente, mientras que los tratamientos presentaron valores entre 31.33 a 62.00, -20.00 a -11.00 y 24.33 a 31.67 para L^* , a^* y b^* , respectivamente. El proceso de liofilización presentó la mayor diferencia en el color con respecto a las hojas frescas, lo cual se evidenció por su valor de 32.57 para ΔE . Esto puede ser debido al tratamiento previo de congelación al que son sometidas las muestras para la posterior sublimación del agua, resultados similares al cambio de color luego del proceso de liofilización fueron encontrados por Telfser & Galindo (2019) para hojas de albahaca. Otro parámetro importante es la coordenada a^* , indicativo de la variación del color verde en las hojas y cambios en esta se encuentran asociados con la degradación de la clorofila, siendo la clorofila A la más inestable y susceptible a la pérdida del átomo central de magnesio de su anillo porfirínico, generando un pardeamiento en las hojas (Thamkaew et al., 2021). Al considerar la tendencia de los datos, se observa que los tratamientos que presentan un mayor valor en la coordenada a^* , es decir, disminución del componente verde de las hojas, son los casos asociados con mayores tiempos de secado, en su orden: liofilización, secado solar, microondas a 360 W y convectivo a 40°C.

Tabla 3-2. Parámetros de color para las hojas frescas y deshidratadas.

Nombre	L^*	a^*	b^*	ΔE	
Hojas frescas	37.33	-26.00	33.33	0.00	
Secado convectivo	40°C	35.00 ^{cd}	-17.00 ^{cd}	25.67 ^{bcde}	12.99 ^b
	50°C	41.67 ^b	-20.00 ^e	27.33 ^{bcde}	9.58 ^{de}
	60°C	38.67 ^{bc}	-20.00 ^e	24.00 ^e	11.30 ^{bcde}
	70°C	36.00 ^{bcd}	-18.67 ^{de}	31.67 ^a	6.80 ^f
	80°C	39.00 ^{bc}	-19.33 ^{de}	24.67 ^{cde}	11.88 ^{bcd}
Secado en microondas	360 W	39.33 ^{bc}	-15.00 ^{bc}	27.67 ^{abcde}	13.58 ^b
	540 W	40.33 ^{bc}	-18.67 ^{de}	28.67 ^{abc}	9.21 ^e
	720 W	31.33 ^d	-19.67 ^e	24.33 ^{de}	13.63 ^b
	900 W	36.33 ^{bcd}	-18.00 ^{de}	29.67 ^{ab}	10.09 ^{cde}
Liofilización	62.00 ^a	-11.00 ^a	25.00 ^{cde}	32.57 ^a	
Secado solar	35.00 ^{cd}	-14.33 ^b	28.33 ^{abcd}	12.12 ^{bc}	

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones. Los valores en la misma columna con la misma letra no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

3.1.3 Cinética de secado

En la Figura 3-2 se presenta la cinética de secado obtenida para las hojas de moringa en bandejas, la disminución de la humedad se da desde el 76.67% hasta aproximadamente 6% en un tiempo de 289, 165, 80, 60 y 40 min para las temperaturas de 40, 50, 60, 70 y 80°C respectivamente. Lo anterior, evidencia que a mayor temperatura menor es el tiempo de secado, esto se debe a que hay mayor energía disponible que permite la migración de la humedad dentro del material vegetal hacia la superficie más rápidamente. En la Figura 3-3, se evidencia que un incremento en la temperatura también genera un aumento en la velocidad de secado, lo cual está asociado con el fenómeno descrito anteriormente.

La etapa de acondicionamiento y velocidad constante no se observan en el proceso (Figura 3-3), esto puede estar relacionado con los tiempos de muestreo empleados y con la baja cantidad de humedad superficial presente en las hojas. La etapa dominante del proceso es la de velocidad decreciente, como se observa en la Figura 3-3, ya que requiere mayor tiempo y energía. Es en esta etapa que el agua que se encuentra dentro de los poros del material se difunde al exterior de este; observaciones similares han sido reportadas en la literatura para el proceso de deshidratación hojas de diferentes plantas (Doymaz, 2017; Shinde et al., 2013).

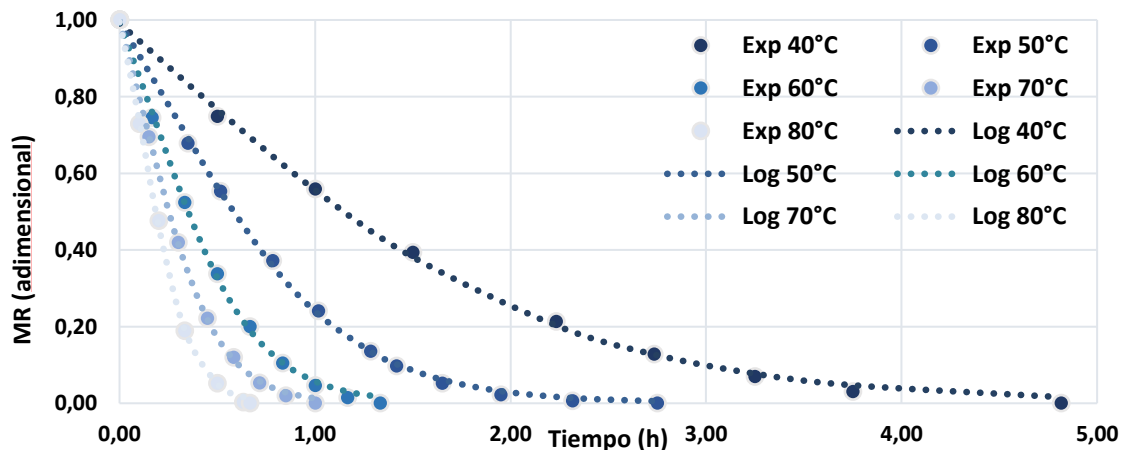


Figura 3-2. Curvas para secado convectivo.
Datos experimentales (Exp) y ajuste al modelo *Logistics* (Log).

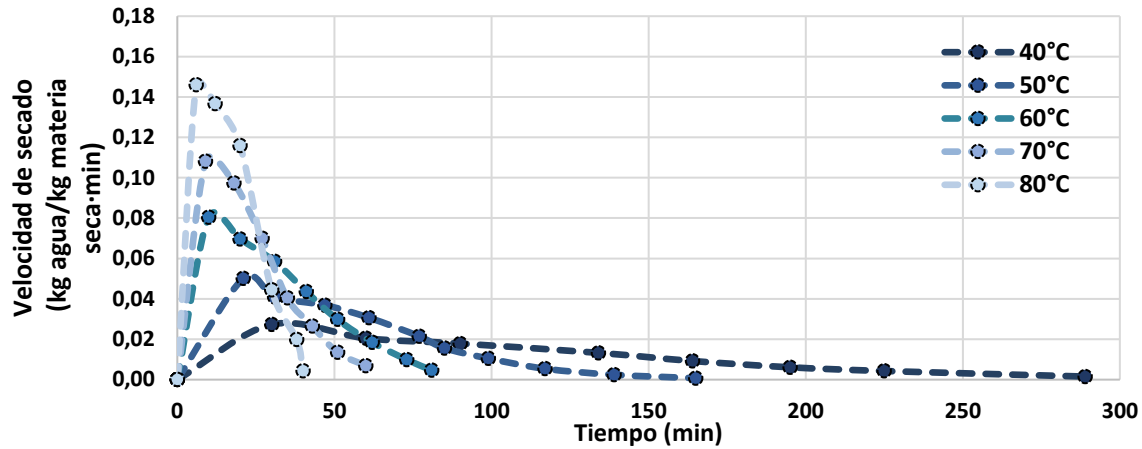


Figura 3-3. Curvas de velocidad de secado vs. tiempo (procesos convectivos).

En el caso del secado por microondas (Figura 3-4), la humedad tuvo una disminución desde 76.67% a 6% en un tiempo de 12, 5, 3 y 2.7 minutos para las potencias de 360, 540, 720 y 900 W, respectivamente. A partir de esto, se confirmó que la velocidad de eliminación del agua fue aumentando conforme se incrementó la potencia de las microondas. Por otro lado, al comparar con el secado en bandejas, la mayor velocidad de secado hallada para 900 W fue de $3.29 \text{ kg agua/ kg de materia seca} \cdot \text{min}$, siendo esta 22 veces más alta que la obtenida para el proceso convectivo a 80°C .

La etapa de velocidad constante no fue observada para los procesos de secado en microondas, sin embargo, si se presentó la etapa asociada al acondicionamiento del material. La etapa dominante del proceso (Figura 3-5) corresponde nuevamente al periodo de velocidad decreciente, donde la conversión de la energía electromagnética a térmica, se ve disminuida al reducir la cantidad de agua disponible en el material (Torki-Harchegani et al., 2016).

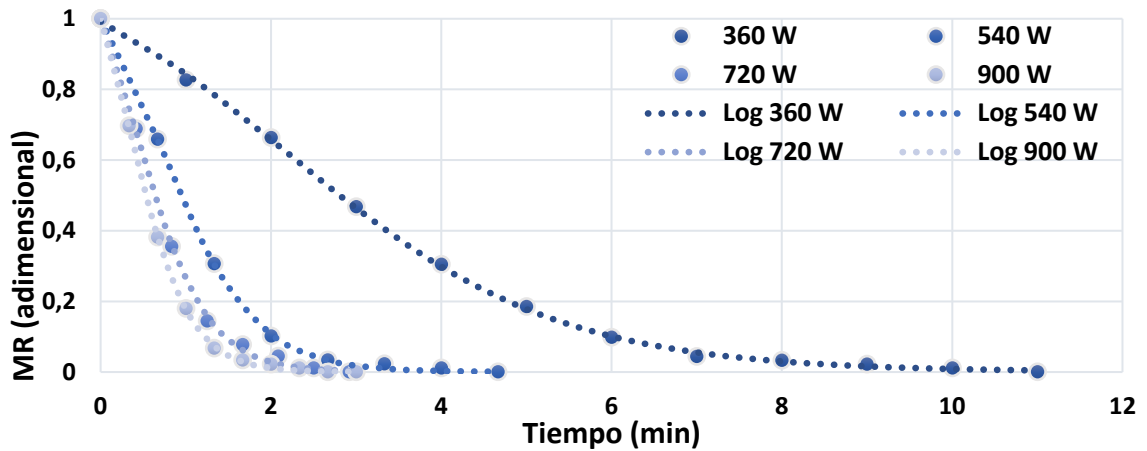


Figura 3-4. Curvas de secado en microondas. Datos experimentales (•) y ajuste al modelo *Logistics* (---).

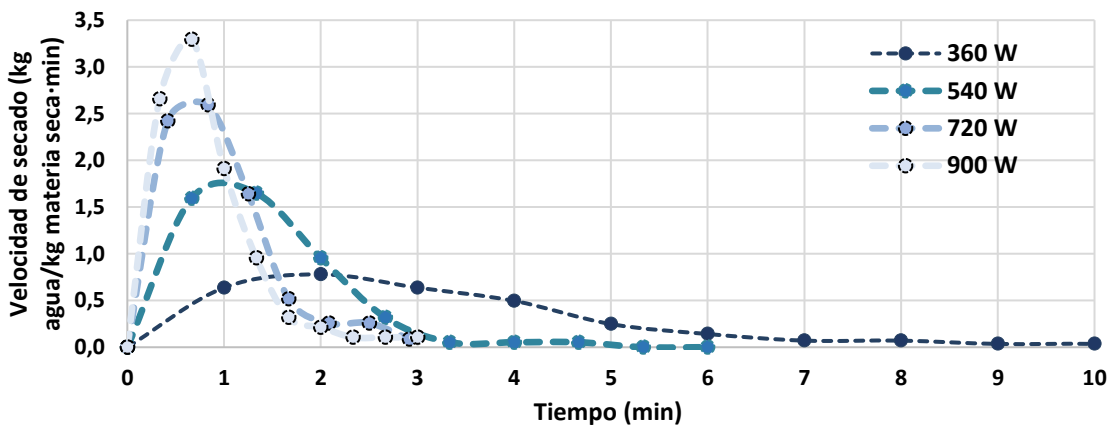


Figura 3-5. Curvas de velocidad de secado vs. tiempo (procesos con microondas)

En cuanto al tiempo de secado del material vegetal, este fue disminuyendo conforme se aumentó la temperatura del aire en el secado convectivo y la potencia en el microondas. Además, se observó que al contrastar el proceso convectivo de más alta energía (80°C) con los procesos por microondas, estos permitieron una reducción en el tiempo del 93 y 70% para las potencias de 900 y 360 W, respectivamente; observando así una amplia diferencia entre estas dos metodologías de deshidratación con respecto al tiempo de duración. Otros estudios también han reportado una disminución en el tiempo requerido de un 90% por el uso de microondas en el secado de hojas de laurel (Khodja et al., 2020) y

en secado de champiñones (Giri & Prasad, 2007). Lo anterior, destaca las ventajas que presenta las microondas en cuanto a su rápida disipación de la energía dentro del material, calentando de forma volumétrica la muestra (Meda et al., 2017).

3.1.4 Ajuste a modelos de secado

Los modelos cinéticos desarrollados para los procesos de deshidratación permiten conocer la tasa de cambio que presenta la pérdida de humedad en diferentes matrices alimentarias, esto con el fin de conocer el comportamiento del agua a lo largo del secado y así obtener un acercamiento al modelado y optimización efectiva de las diferentes metodologías de secado (Inyang et al., 2018; López-Vidaña et al., 2017). En la Tabla 3-3 se presentan los parámetros obtenidos para cada modelo y los valores para R^2 , $RMSE$ y SSE .

El criterio de selección del mejor modelo para la cinética de secado en bandejas fue realizado a partir de los valores obtenidos de R^2 , $RMSE$ y SSE . Los valores más bajos de R^2 (0.9747 a 0.9888) se obtuvieron para los modelos de Newton y Henderson & Pabis al ser evaluados en todas las temperaturas de operación, mientras los valores más altos fueron registrados por los modelos de Midilli et al. y *Logistics* con valores entre 0.9987 y 0.9999. Sin embargo, el modelo desarrollado por Midilli et. al presenta valores negativos de la velocidad de secado al final del proceso, lo cual es incongruente con la realidad. Casos similares fueron reportados para el secado de diferentes plantas como albahaca, apio de monte, menta, orégano, perejil y rúcula (Śledź et al., 2013). Por lo anterior, el modelo seleccionado para representar la cinética fue *Logistics*, el cual también presenta los valores más bajos para los parámetros de $RMSE$ y SSE con respecto a los demás modelos. En la Figura 3-2 se muestra el ajuste a los datos experimentales.

Tabla 3-3. Resumen de los ajustes a modelos cinéticos para el secado convectivo.

Modelo de secado	Parámetro	40 °C	50 °C	60°C	70°C	80°C
Page	$k (m^{-1})$	0.5963	1.4310	2.8220	4.4180	7.9460
	n	1.2230	1.3160	1.3200	1.3330	1.4370
	R^2	0.9980	0.9989	0.9984	0.9996	0.9988
	SSE	0.0020	0.0012	0.0016	0.0004	0.0011
	RMSE	0.0168	0.0114	0.0150	0.0083	0.0149
Henderson & Pabis	a	1.0320	1.0440	1.0440	1.0380	1.0470
	$k (m^{-1})$	0.6963	1.4300	2.3920	3.3250	4.5880
	R^2	0.9902	0.9853	0.9848	0.9861	0.9790
	SSE	0.0098	0.0159	0.0155	0.0128	0.0198
	RMSE	0.0374	0.0421	0.0472	0.0462	0.0629
Newton	$k (m^{-1})$	0.6755	1.3790	2.3040	3.2240	4.4060
	R^2	0.9888	0.9831	0.9823	0.9843	0.9761
	SSE	0.0112	0.0183	0.0180	0.0146	0.0225
	RMSE	0.0374	0.0428	0.0474	0.0456	0.0612
Two terms exponential	a	1.7510	1.8690	1.8580	1.8940	1.9710
	$k (m^{-1})$	0.9194	1.9780	3.2910	4.6630	6.7540
	R^2	0.9977	0.9981	0.9973	0.9989	0.9971
	SSE	0.0023	0.0021	0.0027	0.0011	0.0027
	RMSE	0.0181	0.0152	0.0196	0.0132	0.0233
Logistic	a	0.7728	0.5493	0.5076	0.5141	0.3267
	b	1.7570	1.5410	1.4980	1.5110	1.3200
	$k (m^{-1})$	1.0270	2.2900	3.9050	5.4360	8.6790
	R^2	0.9987	0.9993	0.9990	0.9996	0.9992
	SSE	0.0013	0.0008	0.0011	0.0003	0.0007
	RMSE	0.0147	0.0101	0.0133	0.0082	0.0134
Midilli et. al	a	0.9951	0.9960	0.9966	0.9993	0.9970
	b	-0.0081	-0.0051	-0.0264	-0.0192	-0.0304
	$k (m^{-1})$	0.5784	1.3920	2.5210	4.0790	7.0930
	n	1.1580	1.2920	1.2450	1.2860	1.3840
	R^2	0.9992	0.9992	0.9996	0.9999	0.9993
	SSE	0.0008	0.0008	0.0004	0.00005	0.0006
	RMSE	0.0123	0.0108	0.0092	0.0036	0.0144

En el caso del secado por microondas los modelos de Newton y Herdenson & Pabis, nuevamente presentaron los valores de R^2 más bajos con valores desde 0.9665 hasta 0.9854. Por otro lado, los valores más altos de R^2 (0.9988 a 0.9998) fueron obtenidos con los modelos de *Logistics*, Page y Midilli et al., siendo el modelo *Logistics* seleccionado como el mejor ajuste para el fenómeno de deshidratación. Esto debido a que el ajuste de Page, a pesar de tener valores muy cercanos para *RMSE* y *SSE*, no eran superiores a los obtenidos por *Logistics*; y Midilli et al. presentó valores negativos del contenido de humedad, en la parte final del proceso para la potencia de 360 W. Los resultados se resumen en la Tabla 3-4 y en la Figura 3-4 se presenta el grafico de ajuste al modelo seleccionado.

Adicionalmente, el modelo de *Logistics* fue reportado por Śledź et al. (2013) como el mejor ajuste para los datos experimentales del secado hibrido (convectivo – microondas) de diferentes materiales vegetales. En contraste con los resultados alcanzados, en el estudio realizado por Potisate et al. (2015) para el secado de hojas de Moringa en microondas, se describe como modelo con mayor bondad de ajuste al *Three parameter model*, el cual fue evaluado también en este caso de estudio, pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios (no presentados), los resultados obtenidos para los diferentes modelos se resumen en la Tabla 3-4.

Los valores obtenidos para la constante de secado k , presentaron en el ajuste de *Logistics* un aumento durante los dos procesos de secado (convectivo y microondas), es así como para 40°C presenta un valor de 0.017 min^{-1} e incrementa hasta obtener un valor de 0.145 min^{-1} a una temperatura de 80°C, e igualmente en el caso de la potencia del microondas con un valor de 0.687 min^{-1} a 360 W y 2.886 min^{-1} a 900 W. Esto se explica ya que el valor de la constante k es definido como la velocidad de salida del agua del material y está relacionado con las condiciones externas del proceso, por lo cual con el aumento de la temperatura del aire de secado y la potencia de las microondas, la energía asociada del sistema incrementa y la velocidad de secado es mayor, como se confirma con el aumento de este coeficiente (Giri & Prasad, 2007; Puttalingappa et al., 2022; Siqueira et al., 2012). Adicionalmente, se observa que los valores de k obtenidos para el caso de microondas son mayores a los del secado convectivo, lo cual está asociado con la energía de las

microondas que al incidir sobre el material incrementan la cinética de los fenómenos de transferencia de calor y masa (Giri & Prasad, 2007).

Tabla 3-4. Resumen de los ajustes a modelos cinéticos para el secado con microondas.

Modelo de secado	Parámetro	360 W	540 W	720 W	900 W
Page	<i>k</i> (min⁻¹)	0.1502	0.7705	1.3280	1.7500
	<i>n</i>	1.5090	1.5170	1.4180	1.4160
	<i>R</i>²	0.9988	0.9997	0.9990	0.9997
	SSE	0.0017	0.0004	0.0010	0.0003
	RMSE	0.0130	0.0068	0.0129	0.0062
Henderson & Pabis	<i>k</i> (min⁻¹)	0.3230	0.9266	1.3310	1.6030
	<i>a</i>	1.0790	1.0390	1.0400	1.0420
	<i>R</i>²	0.9732	0.9825	0.9835	0.9854
	SSE	0.0369	0.0189	0.0157	0.0160
	RMSE	0.0608	0.0487	0.0512	0.0448
Newton	<i>k</i> (min⁻¹)	0.3026	0.8996	1.2880	1.5500
	<i>R</i>²	0.9665	0.9809	0.9816	0.9835
	SSE	0.0461	0.0207	0.0176	0.0181
	RMSE	0.0647	0.0479	0.0502	0.0449
Two terms exponential	<i>a</i>	2.0070	2.1100	1.0080	1.9970
	<i>k</i> (min⁻¹)	0.4631	1.4360	1.2880	2.3630
	<i>R</i>²	0.9960	0.9994	0.9816	0.9995
	SSE	0.0055	0.0006	0.0176	0.0005
	RMSE	0.0235	0.0090	0.0542	0.0079
Logistic	<i>a</i>	0.2464	0.2742	0.3743	0.3764
	<i>b</i>	1.2370	1.2740	1.3780	1.3780
	<i>k</i> (min⁻¹)	0.6368	1.8380	2.4190	2.8860
	<i>R</i>²	0.9996	0.9998	0.9989	0.9998
	SSE	0.0006	0.0003	0.0010	0.0003
	RMSE	0.0080	0.0062	0.0142	0.0061
Midilli et al.	<i>a</i>	0.9873	0.9999	1.0020	0.9999
	<i>b</i>	-0.0004	0.0007	0.0033	0.0015
	<i>k</i> (min⁻¹)	0.1428	0.7722	1.3530	1.7290
	<i>n</i>	1.5290	1.5250	1.4420	1.4260
	<i>R</i>²	0.9989	0.9997	0.9991	0.9997
	SSE	0.0015	0.0003	0.0008	0.0003
	RMSE	0.0136	0.0073	0.0145	0.0065

3.1.5 Difusividad efectiva

Los valores de difusividad efectiva fueron calculados tanto para el secado convectivo como para el de microondas y los resultados se presentan en la Tabla 3-5. En el caso de secado convectivo con el incremento de la temperatura de 40°C a 80°C se obtuvieron valores entre $5.848 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ a $5.671 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, los cuales son menores a los valores obtenidos en el secado por microondas ($1.842 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $7.900 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Esto se explica debido a que la energía asociada a las microondas es absorbida al interior del material, lo cual aumenta rápidamente el gradiente de presión y temperatura, permitiendo la apertura de los poros y una difusión más alta del agua hacia la superficie de las hojas (Puttalingappa et al., 2022; Yilmaz et al., 2021). Los valores encontrados son superiores a los reportados por Potisate et al. (2015) para el secado de hojas de Moringa con microondas, lo cual puede estar asociado a las condiciones del proceso como la cantidad de materia deshidratada y la configuración de tanto del equipo de secado como la disposición de las hojas en el horno (Demirhan & Özbek, 2011).

Tabla 3-5. Valores de difusividad efectiva y energía de activación para los procesos de secado convectivo y microondas.

Tratamiento	Condición	D_{eff} (m^2/s)	E_a
Secado convectivo	40°C	5.848×10^{-12}	48.71 kJ/mol
	50°C	1.420×10^{-11}	
	60°C	2.261×10^{-11}	
	70°C	2.968×10^{-11}	
	80°C	5.671×10^{-11}	
Microondas	360 W	1.842×10^{-10}	49.30 W/g
	540 W	4.661×10^{-10}	
	720 W	6.837×10^{-10}	
	900 W	7.900×10^{-10}	

3.1.6 Energía de activación

La energía de activación (E_a) permite calcular el potencial de unión de la humedad con el sólido, siendo así, que se define como la cantidad de trabajo necesaria para eliminar una mol o un gramo de humedad en el material (Fang et al., 2009). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3-5, estos se encuentran dentro del rango general para la

deshidratación de alimentos (Doymaz & Karasu, 2018), los cuales fueron de 48.71 kJ/mol para el caso de secado convectivo y 49.30 W/g para microondas.

Los valores de E_a encontrados en el presente trabajo, para cada una de las metodologías evaluadas, fueron comparables con los obtenidos en el secado de hojas de divesos vegetales: 32.74 kJ/mol y 55.84 W/g para hojas de moringa (Potisate et al., 2015; Premi et al., 2012), 49.32 kJ/mol para perejil (Doymaz et al., 2006) y 43.46 kJ/mol para menta (Torki-Harchegani et al., 2016).

3.2 Efecto del secado sobre la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes

3.2.1 Extractos para la caracterización antioxidante

La elección del solvente de extracción para los análisis se realizó al considerar que las mezclas de etanol y agua (80:20) son soluciones comúnmente empleadas para la extracción de componentes antioxidantes y son aprobadas por la industria alimentaria al no ser peligrosas para la salud humana (Degot et al., 2021). Además Dent et al. (2013) expresan que las mezclas hidroalcohólicas de etanol son posiblemente los solventes más adecuados para la extracción de polifenoles, debido a las diferentes polaridades de los componentes bioactivos y su aceptación como solvente de grado alimenticio.

Por otra parte, Pereira et al. (2021), reportaron que el proceso de extracción asistida por homogenización (ultraturax) fue adecuado para la extracción de componentes polifenólicos y con actividad antioxidante, con una eficiencia mayor comparada con el uso de ultrasonido y otros métodos de extracción. Esto se puede explicar por la alta frecuencia de cizallamiento aplicada por el equipo en las extracciones sólido- líquido, que causa una ruptura de las estructuras celulares de la planta en unos pocos segundos y favorece la liberación de metabolitos como los compuestos fenólicos (Santos et al., 2018).

En la Figura 3-6 se presentan las diferentes soluciones obtenidas de los extractos para la realización de los análisis de caracterización antioxidante para las hojas de moringa frescas y posterior a los tratamientos de secado convectivo a las temperaturas evaluadas.

Además, en la Figura 3-7 se incluyen los extractos obtenidos para las hojas frescas, junto con los tratamientos de secado en microondas a las diferentes potencias evaluadas, liofilización y secado solar. En esta figura se destaca el color verde del extracto para las hojas liofilizadas, el cuál es más intenso que en los otros tratamientos, esta observación permitiría pensar que el tratamiento por liofilización fue el que ocasionó la menor degradación del pigmento de clorofila, siendo esta conclusión contraria a la observada con el análisis de color en las hojas (Figura 3-1). Sin embargo, una posible explicación que surge es que, en la etapa de congelación solo las capas más superficiales de las hojas son afectadas, presentando el color blanco observado, las cuáles a su vez generan un recubrimiento que ayudan a proteger las capas internas y disminuyen su degradación.

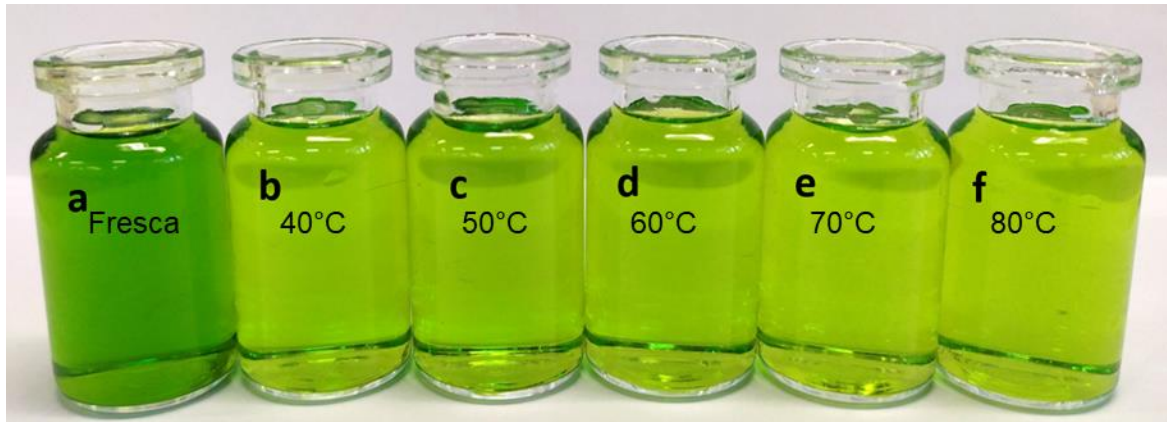


Figura 3-6. Extractos obtenidos de las hojas frescas (a) y después del secado convectivo a las diferentes temperaturas: 40°C (b), 50°C (c), 60°C (d), 70°C (e) y 80°C (f).

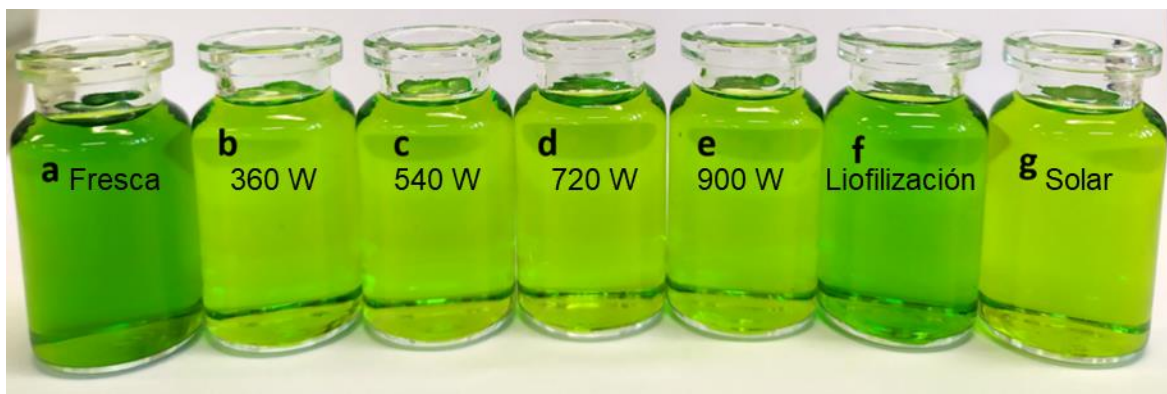


Figura 3-7. Extractos obtenidos de hojas frescas (a), después del secado en microondas a: 360 W (b), 540 W (c), 720 W (d) y 900 W (e); liofilizada (f) y secado solar (g).

3.2.2 Evaluación del contenido de polifenoles

Los principales compuestos fenólicos presentes en las hojas de *M. oleifera* incluyen al menos 5 lignanos, 26 flavonoides y 11 ácidos fenólicos junto con sus derivados (Saucedo-Pompa et al., 2018). La concentración de estos fitoquímicos en los diferentes tejidos de las plantas dependen de las condiciones medioambientales del país de origen, la época de cosecha, el genotipo de la planta, el estado de maduración del tejido y el método de extracción utilizado (Ribaud et al., 2019).

El contenido de polifenoles para las hojas frescas de moringa fue de 2357.48 ± 95.02 mg EAG/100 g BS, en la Figura 3-8 se muestra que durante el proceso de secado convectivo se dio una disminución en estos metabolitos entre 31% para 50°C a 44% para 80°C, con respecto a las hojas frescas. Aparentemente 50°C fue la temperatura de secado más adecuada para la conservación de los compuestos fenólicos en las hojas evaluadas. Khodja et al. (2020) también encontraron un comportamiento variable en el contenido de polifenoles para hojas de *Laurus nobilis*, al deshidratarlas por aire caliente a diferentes temperaturas y atribuyeron este comportamiento a la variación de la temperatura empleada y su relación con el tiempo de secado. Esta explicación sería también aplicable a los resultados obtenidos, debido a que el incremento de la temperatura de secado puede reducir el tiempo de exposición del material durante el proceso, a causa del rápido secado de las hojas, pero a su vez promueve la disminución de los componentes bioactivos.

Por otra parte, el efecto de la potencia sobre el contenido de polifenoles para el secado por microondas es presentado en la Figura 3-9. En esta gráfica se puede observar que se presentan diferencias significativas de todos los tratamientos con respecto a las hojas frescas, permitiendo concluir que también ocurre degradación de estos compuestos fenólicos durante el secado con microondas. La disminución del contenido fenólico se encuentra asociada a la potencia empleada, observándose una mayor conservación de estos compuestos bioactivos (76%) a la mayor potencia evaluada (900 W) y el valor más bajo (48%) a la menor potencia (360 W). Una tendencia similar fue reportada por Puttalingappa et al. (2022) hallando un incremento en el contenido fenólico con el incremento de la potencia de las microondas.

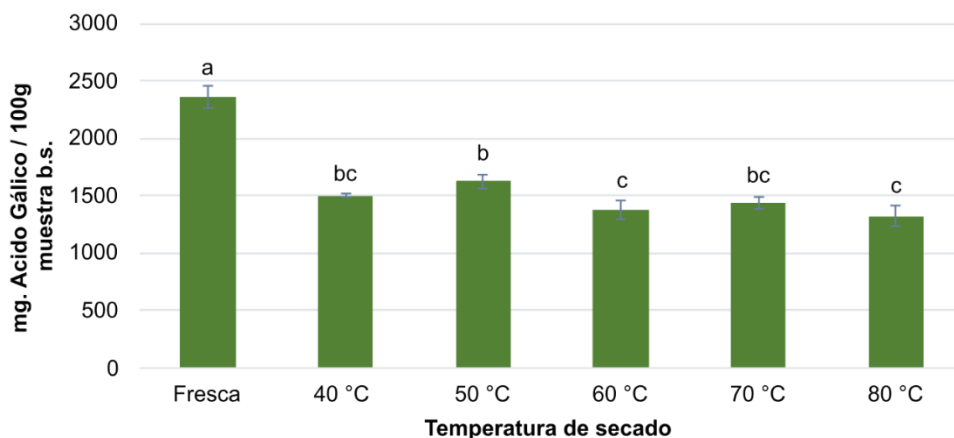


Figura 3-8. Efecto de la temperatura de secado en el contenido de polifenoles.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

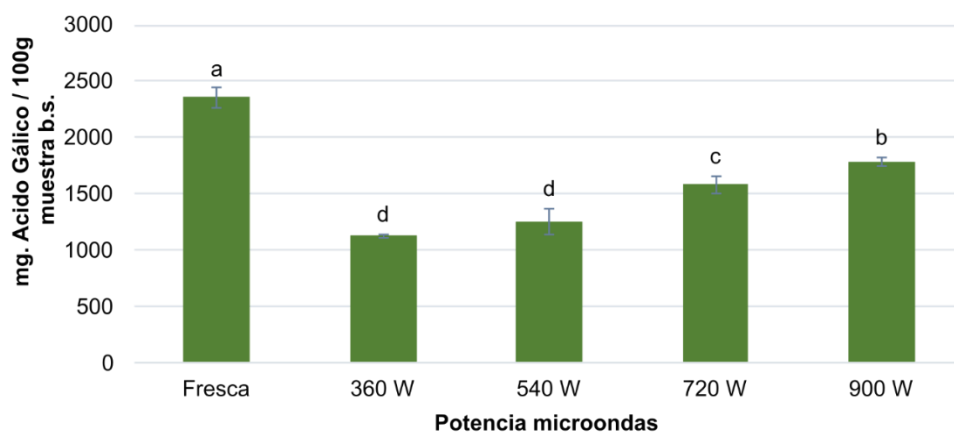


Figura 3-9. Efecto de la potencia de secado en el contenido de polifenoles.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

En la Figura 3-10 se presentan los resultados para todos los procesos de secado empleados. En esta se destaca que el proceso de liofilización es la alternativa que permitió conservar el mayor contenido de polifenoles (98%) en las hojas de moringa, sin presentar diferencias significativas con respecto a las hojas frescas, las operaciones de secado a 360 W y solar fueron las que causaron una mayor degradación de los componentes fenólicos, manteniendo únicamente el 48% y 51% con referencia a las hojas frescas. Por otra parte, los procesos de secado a 900 W, 720 W y 50°C se destacaron como alternativas

de interés, ya que permitieron una conservación del 76, 67 y 67% de estos bioactivos, respectivamente.

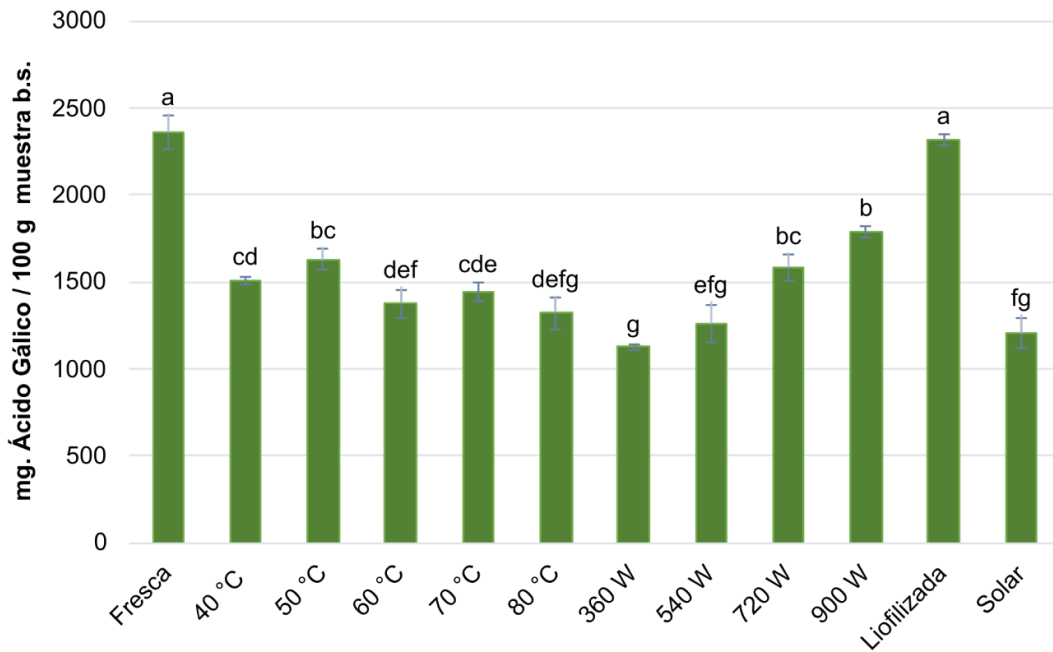


Figura 3-10. Contenido de polifenoles en todos los procesos de secado evaluados. Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Finalmente, al comparar con datos en la literatura, se encontró que el contenido de polifenoles para las hojas de moringa fue cercano a los valores de 2400 mg EAG/100 g BS reportado por Jayawardana et al. (2015). Además, Rodríguez-Pérez et al. (2015) reportaron concentraciones levemente superiores mediante la extracción por maceración a partir de hojas de *M. oleifera* con diferentes sistemas de solventes, con valores de 2430 ± 30 y 2700 ± 20 mg EAG/100 g BS para soluciones acuosas de etanol al 70% y 50%, respectivamente. De acuerdo con los resultados de Pakade et al. (2013), el contenido de polifenoles en las hojas de moringa fue aproximadamente dos veces mayor al presente en vegetales como lechuga, espinaca, arvejas, coliflor y brócoli.

3.2.3 Evaluación del contenido de flavonoides

El grupo predominante de compuestos fenólicos en las hojas de *M. oleifera* son los flavonoides, siendo el kaempferol, la quercetina y sus derivados, los de mayor predominancia (Rodríguez-Pérez et al., 2015). Los resultados del contenido de flavonoides para las hojas frescas tratadas por secado convectivo son presentados en la Figura 3-11.

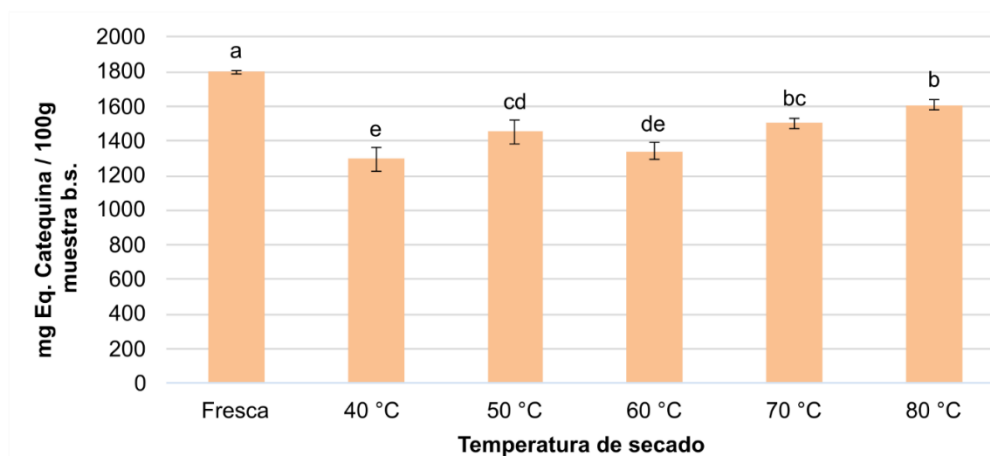


Figura 3-11. Efecto de la temperatura en el contenido de flavonoides.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

El contenido de flavonoides totales obtenido para las hojas frescas fue de 1800.19 ± 11.71 mg EC/100 g BS, este se ve disminuido por efecto de la temperatura de secado, presentando una degradación de estos compuestos bioactivos. Las hojas deshidratadas a 40°C y 60°C fueron las que presentaron los menores valores de retención de los flavonoides, siendo estos de 72 y 75 %, respectivamente, mientras que las temperaturas de 80°C y 70°C permitieron una mayor conservación de estos metabolitos con valores de 89 y 84 %, respectivamente. Además, los resultados presentan un comportamiento variable con respecto a la temperatura de deshidratación, al igual que el obtenido para la concentración de polifenoles, siendo este comportamiento similar al descrito por Hihat et al. (2017) para el contenido de flavonoides mediante secado convectivo en hojas de cilantro (*Coriandrum sativum* L.).

Para el secado por microondas, el efecto de la potencia sobre el contenido de flavonoides es mostrado en la Figura 3-12. El comportamiento presentado en este caso es similar al

obtenido para el contenido de polifenoles, destacando que la potencia empleada para el secado tiene un efecto significativo en la conservación de los flavonoides, esto se comprobó mediante un valor de correlación R de Pearson equivalente a 0.796, indicando así una correlación fuerte entre estos dos parámetros. El tratamiento a 900 W favoreció la mayor retención de estos componentes bioactivos (98%) sin presentar diferencias significativas con la concentración en las hojas frescas. Adicionalmente, los valores de retención para los otros tratamientos fueron de 69, 77 y 85% para las potencias de 360, 540 y 720 W, respectivamente. Estos resultados están acorde con lo expuesto por Dong et al. (2011) para el secado de flor de *Eucommia ulmoides*, que a bajas potencias de microondas (140 – 420 W) la cantidad de flavonoides era menor con respecto a las tratadas a potencias superiores (560 – 700 W).

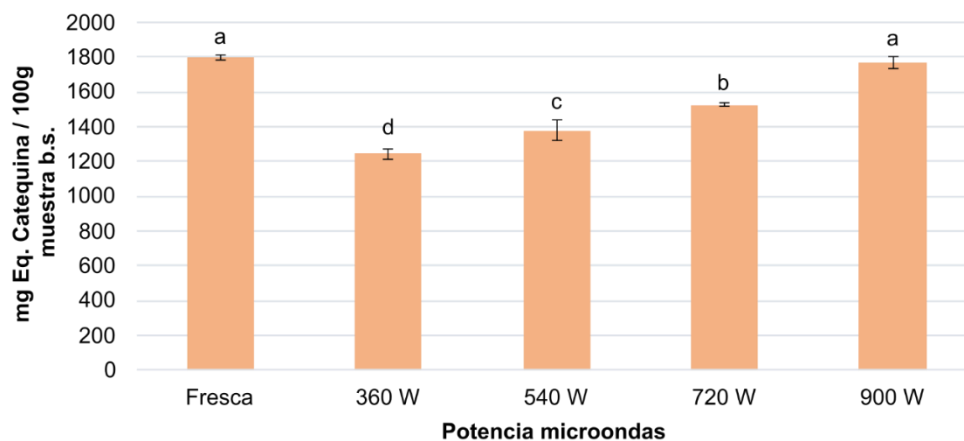


Figura 3-12. Efecto de la potencia de secado en el contenido de flavonoides.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

En la Figura 3-13 se presenta la evaluación del contenido de flavonoides en todos los tratamientos estudiados. El método de secado solar condujo a una retención del 79% de estos metabolitos y la mayor degradación fue asociada con los tratamientos a 360 W, 40°C y 60°C, con valores de 31, 28 y 25, respectivamente. Por otra parte, Las hojas deshidratadas a 900 W y mediante liofilización fueron las que exhibieron una mayor conservación de los flavonoides, sin presentar diferencias significativas en comparación con las hojas frescas.

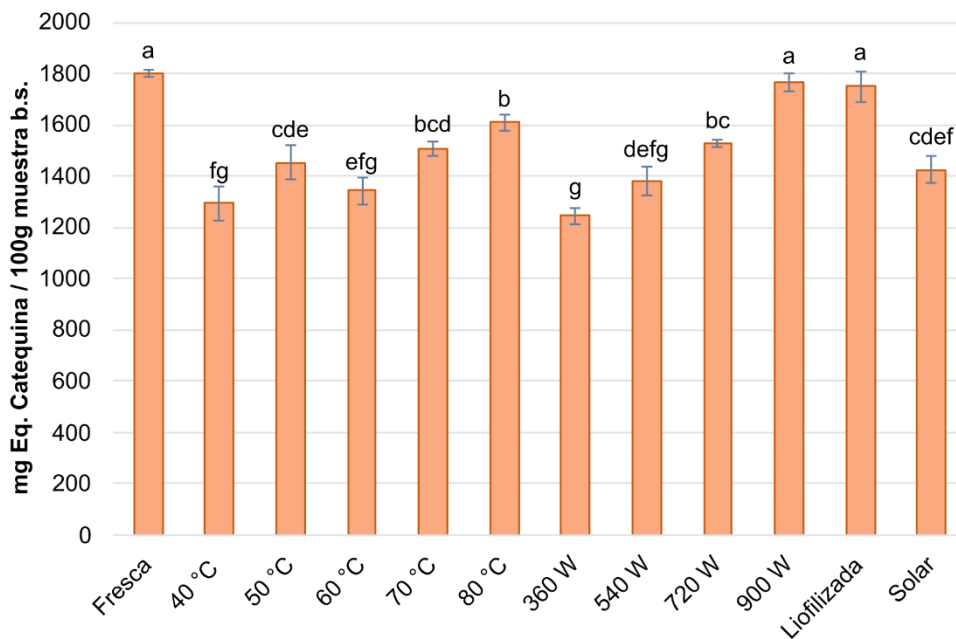


Figura 3-13. Contenido de flavonoides en todos los procesos de secado evaluados.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Coppin et al. (2013) enuncian que en contraste con las vitaminas y en particular con la vitamina C, donde es conocido que el secado causa pérdidas significativas en su contenido, los flavonoides son relativamente estables. Este enunciado puede explicar la diferencia del efecto presentado entre el contenido de fenoles y flavonoides durante los procesos evaluados, ya que en el caso de los polifenoles se dio generalmente una menor conservación, alcanzando valores de degradación hasta del 52 %, mientras que para los flavonoides el mayor valor de disminución fue equivalente al 31%, en relación con las hojas frescas.

Al comparar los valores para las hojas frescas con datos en la literatura, el obtenido en este estudio es superior al reportado por González-Romero et al. (2020) para hojas de moringa cultivadas en España, quienes hallaron un valor de 1338.8 mg EC/100 g BS. Además, la concentración de estos metabolitos en las hojas de moringa fue superior al reportado en hojas de otras plantas como tilo (*Tilia platyphyllos*), salvia (*Salvia officinalis*), tomillo (*Thymus vulgaris*), hierbabuena (*Mentha spicata*) y toronjil (*Melissa officinalis*) con

valores de 279.0, 911.7, 1301.5, 1658.3 y 1542.1 mg EC/100 g BS, respectivamente (González-Romero et al., 2020; Rababah et al., 2015; Selvi, 2020).

3.2.4 Evaluación de la capacidad antioxidante ABTS

ABTS es un método espectrofotométrico que ha sido utilizado para medir la actividad antioxidante de diversos materiales, probando la capacidad que tienen las diferentes muestras de estabilizar el radical catiónico $ABTS^+$ mediante la disminución de su color (Gulcin, 2020). En la Figura 3-14 se presentan los resultados para la determinación de la capacidad antioxidante mediante el método ABTS, antes y después de los procesos de secado convectivo a las diferentes temperaturas evaluadas. En esta se encuentra que los valores de actividad antioxidante para las hojas deshidratadas están en el rango de 35509.01 - 40677.95 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g BS}$, siendo equivalente a valores de conservación desde 56 - 64 %, con respecto a las hojas frescas ($63934.97 \pm 3542.67 \mu\text{mol ET}/100\text{ g BS}$). Sin embargo, de acuerdo con el análisis estadístico realizado, estos resultados no representaron diferencias significativas entre los tratamientos a las diferentes temperaturas. Komonsing et al. (2022) reportaron un comportamiento similar para el secado de cúrcuma en rebanadas, al no hallar diferencias significativas para la capacidad antioxidante ABTS luego del secado en horno de bandejas para las temperaturas de 40 a 80°C.

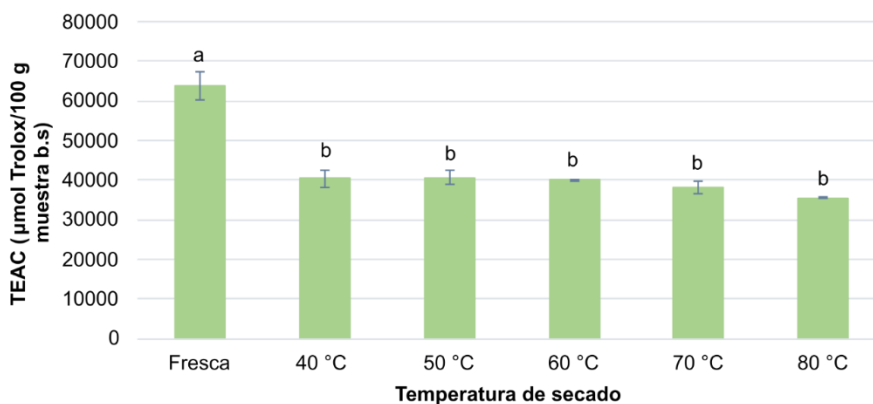


Figura 3-14. Efecto de la temperatura en la capacidad antioxidante ABTS.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Para el caso de la deshidratación por microondas, los resultados del efecto de la potencia en la capacidad antioxidante ABTS, son reportados en la Figura 3-15. Los valores de la capacidad antioxidante por este método se encontraron en el rango desde 29636.29 – 46399.71 $\mu\text{mol ET}/100\text{ g BS}$, con valores de conservación respecto a las hojas frescas equivalentes a 46 -72 %, respectivamente. Los resultados evidencian que las potencias de secado más altas (720 y 900 W) condujeron a una mayor retención de la capacidad antioxidante que las potencias inferiores (360 y 540 W), tendencia similar a la reportada por Mouhoubi et al. (2022) para el secado por microondas de cilantro, en el cual se encontró una mayor capacidad antioxidante para el tratamiento de 1000 W comparado con el proceso a 100 W.

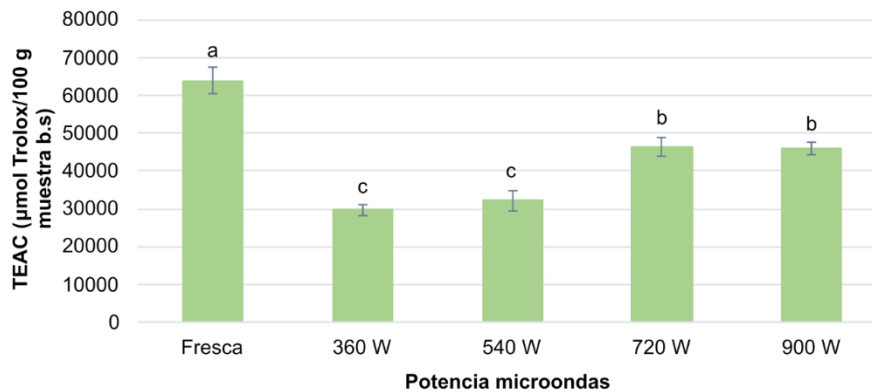


Figura 3-15. Efecto de la potencia de secado en la capacidad antioxidante ABTS.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

En la Figura 3-16 se presentan los resultados de la capacidad antioxidante por el método ABTS para todos los tratamientos de secado evaluados. En esta gráfica, se observa que el proceso de secado a 360 W exhibió el menor valor de conservación (46%) y no presentó diferencias significativas con respecto al solar, en el cual se dio una retención del 53% de esta capacidad, con respecto a las hojas frescas. Además, se destaca que los procesos de 900 W, 720 W y liofilización fueron los métodos de deshidratación que permitieron una mayor conservación de la capacidad antioxidante para las hojas de moringa, con valores de 72, 73 y 82 %, sin encontrar diferencias significativas entre estos. Ademiluyi et al. (2018) también hallaron que con el método de liofilización se dio la menor disminución de la capacidad antioxidante en hojas de moringa, al compararlo con secado por aire y solar.

Valadez-Carmona et al. (2017) también evaluaron el efecto sobre la capacidad antioxidante de la deshidratación de cáscara de cacao mediante tres métodos de secado, encontrando que el proceso de liofilización fue el más adecuado, seguido por microondas y finalmente secado convectivo.

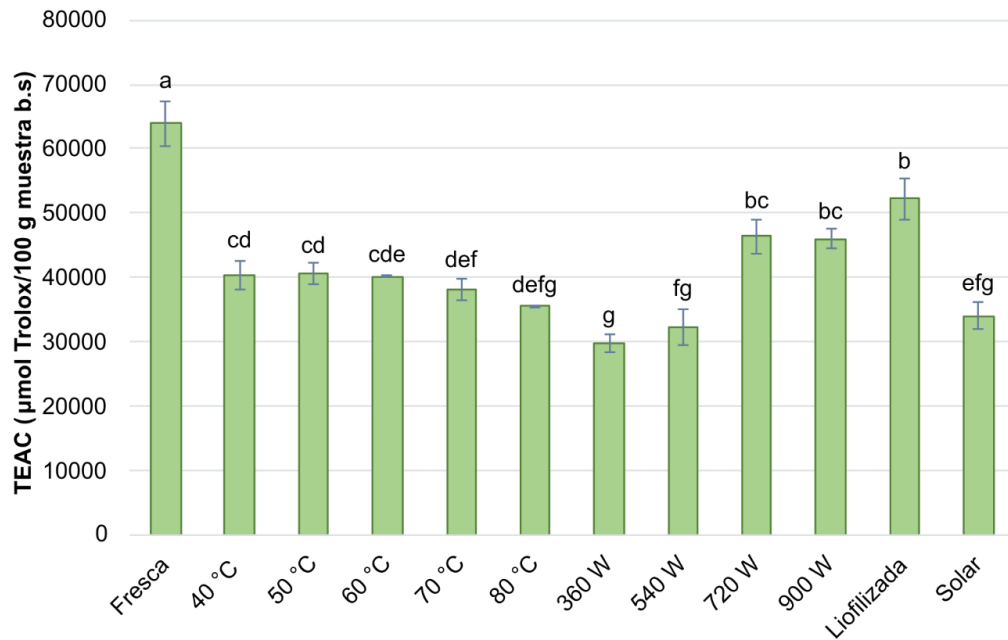


Figura 3-16. Capacidad antioxidante en todos los procesos de secado evaluados.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Por otra parte, al comparar los valores obtenidos para las hojas frescas, se encuentra que este es superior al reportado por Oldoni et al. (2022) para hojas de moringa cultivadas en Brasil durante la estación de primavera, siendo el resultado equivalente a 42705 µmol ET/100 g BS. Esta diferencia puede explicarse a la manera en la que los autores prepararon la muestra para la realización de los análisis, incluyendo una etapa previa de secado de las hojas (40 - 45°C) para la posterior extracción y evaluación de la capacidad antioxidante. En la literatura se encontraron otros reportes para las hojas de moringa con resultados inferiores de la capacidad antioxidante por el método ABTS, en los cuales también se aplicaba una etapa de secado previa a la realización de los análisis (González-Romero et

al., 2020; Pereira et al., 2021), sin embargo, no se halló un estudio en el que se hayan empleado las hojas frescas para la evaluación.

3.2.5 Evaluación capacidad reductora FRAP

La actividad antioxidante en las plantas es generalmente atribuida a la presencia de componentes fenólicos y otros compuestos antioxidantes como vitamina C y carotenoides. FRAP (*Ferric Reducing Antioxidant Power*) es una metodología que mide la capacidad de las sustancias de reducir iones férricos (Fe^{3+}) a Fe^{2+} , que acompañado con TPTZ presenta una coloración intensa en medio ácido, sirviendo esta capacidad reductora como un indicador significativo de la actividad antioxidante (Nobossé et al., 2018). En la Figura 3-17 se muestra el valor obtenido para la capacidad reductora de las hojas de moringa frescas, junto con el efecto de la temperatura del secado convectivo en esta medición antioxidante. Las hojas frescas de moringa presentaron un valor FRAP equivalente a 15197.40 ± 378.81 $\mu\text{mol ET/ 100 g BS}$, siendo este comparable con el reportado por González-Romero et al. (2020) de $3962 \mu\text{mol ET/ 100 g}$ en base húmeda, el cuál haciendo la corrección con el contenido de humedad obtenido por los autores (72.2%) es equivalente a $144251.80 \mu\text{mol ET/ 100 g BS}$.

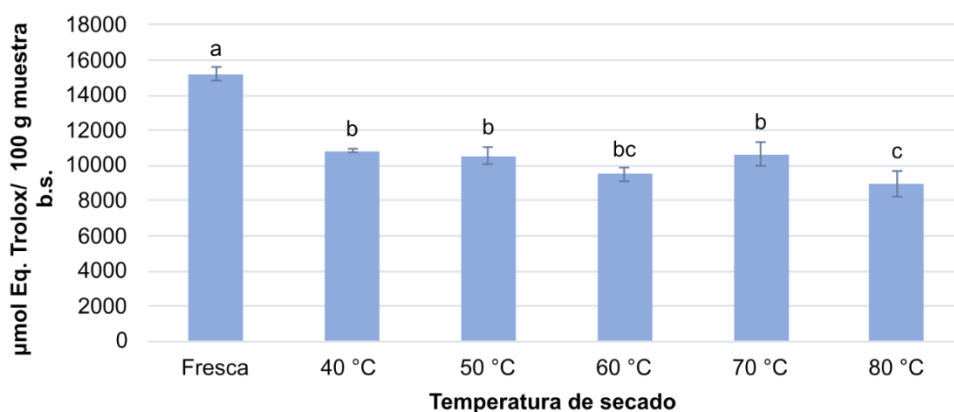


Figura 3-17. Efecto de la temperatura en la capacidad reductora FRAP.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Además, se observa que durante el secado convectivo esta capacidad reductora se disminuye significativamente, presentando un comportamiento variable en función de la temperatura, similar al obtenido para los compuestos fenólicos. El mayor valor de conservación de la actividad reductora fue alcanzado con el tratamiento a 40°C (71 %), presentando únicamente diferencias significativas con el secado a 80°C, que presentó la menor conservación de esta actividad antioxidante (59 %).

Para el caso de secado mediante microondas, el efecto de la potencia en la capacidad reductora FRAP es mostrado en la Figura 3-18. En esta gráfica puede observarse que esta metodología de deshidratación presentó afectaciones en el valor FRAP para las hojas de moringa, disminuyendo su magnitud significativamente en relación con la potencia empleada para la deshidratación. En este trabajo se encontró que las mayores potencias evaluadas favorecieron una mayor conservación de la capacidad reductora en comparación con las menores, siendo estos valores de 51, 61, 76 y 82 % para 360, 540, 720 y 900 W, respectivamente. Kubra & Rao (2012) observaron un comportamiento similar para el secado de jengibre con microondas, encontrando que la capacidad reductora disminuyó con el aumento en el tiempo de secado, que en este caso es equivalente a la disminución de la potencia.

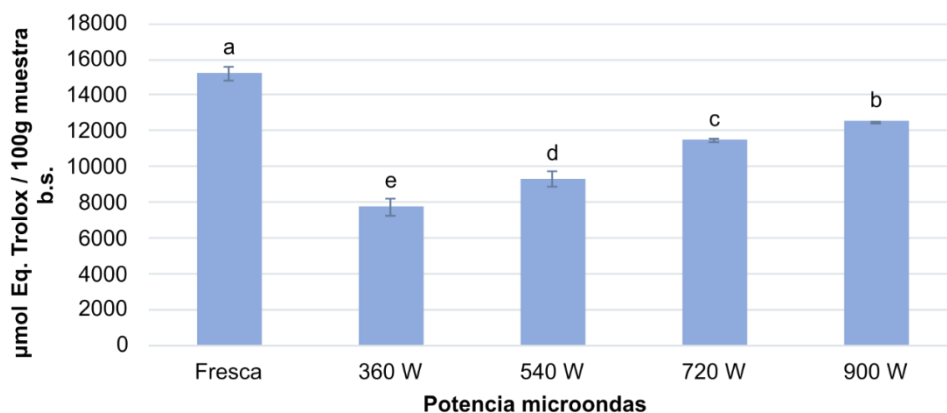


Figura 3-18. Efecto de la potencia en la capacidad reductora FRAP.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

En la Figura 3-19 se presentan los resultados de la capacidad reductora para todos los procesos de deshidratación evaluados, en esta se observa que para el método solar se obtuvo una conservación de esta actividad del 63%, y el secado por microondas con la menor potencia evaluada fue el tratamiento que registró la mayor pérdida (49%), lo cual puede ser atribuido al mayor tiempo de exposición de las hojas a la radiación de las microondas. Por otro lado, se destaca que el proceso de liofilización fue el que permitió una mayor conservación de esta capacidad con un valor de 96% y no se encontraron diferencias significativas, con respecto a las hojas frescas.

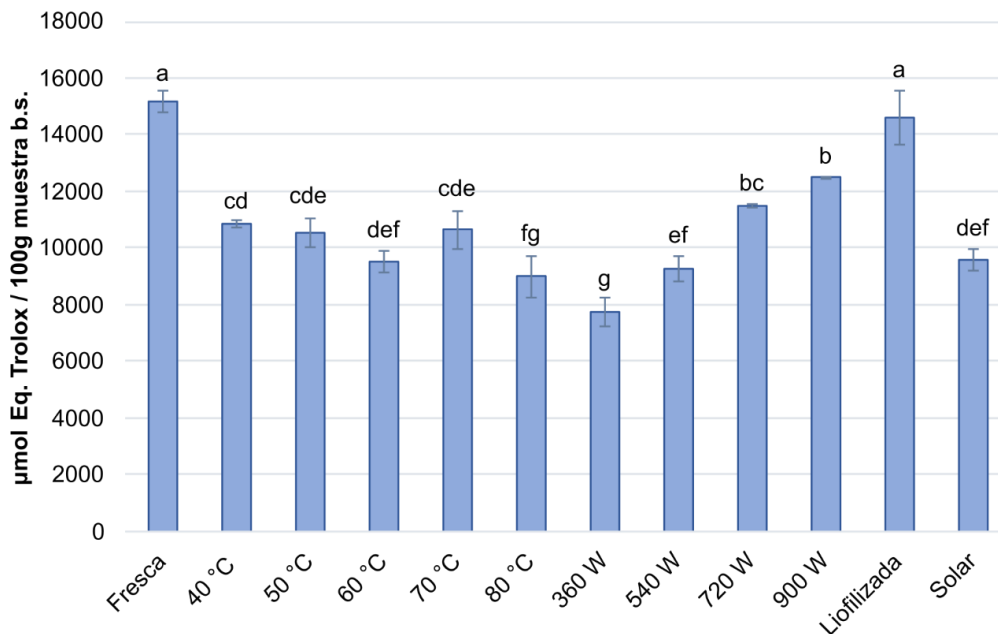


Figura 3-19. Capacidad reductora en todos los procesos de secado evaluados. Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

3.3 Obtención del extracto en polvo e incorporación en la bebida láctea

3.3.1 Evaluación del solvente de extracción

La elaboración de un extracto rico en polifenoles y con buena capacidad antioxidante depende de varios factores como lo son: el método de extracción, la polaridad del solvente

y el tiempo que involucra el procesamiento (Rodríguez-Pérez et al., 2015). En este caso de estudio, se evaluaron diferentes solventes con el fin de reconocer el que mayor cantidad de metabolitos antioxidantes podía extraer. En la Figura 3-20 se muestran los resultados obtenidos del contenido de fenoles totales para los 8 sistemas analizados, en el cual se puede evidenciar que el sistema de extracción de menor contenido de polifenoles fue el de etanol y triacetina (80:20) seguido del sistema de etanol al 100% con valores de 214.25 y 338.70 mg EAG/L extracto, respectivamente. Por otro lado, la mezcla de etanol y agua en las proporciones de 80:20 y 50:50 exhibieron un 90 y 91% más contenido de polifenoles que el sistema etanol y triacetina.

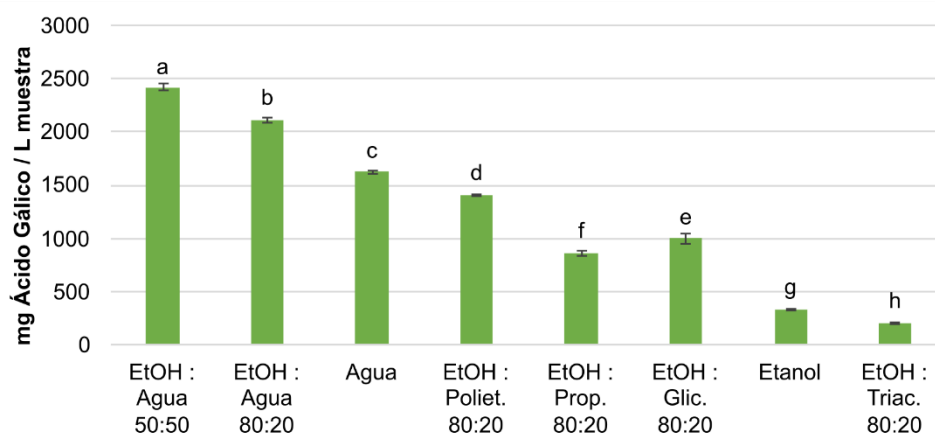


Figura 3-20. Determinación del contenido de polifenoles para los extractos.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Los análisis de capacidad antioxidante por el método de ABTS (Figura 3-21) y FRAP (Figura 3-22), presentan una tendencia similar a la obtenida para el contenido de polifenoles, con lo cual es posible inferir sobre la fuerte relación que presentan los polifenoles con la actividad antioxidante para los extractos. Finalmente, el solvente más adecuado de acuerdo con los ensayos realizados fue la mezcla de etanol y agua en iguales proporciones volumétricas; esto indica la fuerte afinidad de los metabolitos por la fase acuosa, al igual que la acción de mejora que tiene el etanol de permear la célula y favorecer la liberación de los componentes. Otras investigaciones, también hallaron que la mejor la extracción de compuestos antioxidantes de las hojas de moringa fue dada con soluciones acuosas de etanol entre el 50% y 80% (Leone et al., 2015; Rodríguez-Pérez et al., 2015;

Vongsak et al., 2013). Considerando que es permitido para el uso en alimentos y su mejor capacidad extractora de los bioactivos de interés, se escoge la mezcla etanol y agua (50:50) como el solvente para la realización del extracto.

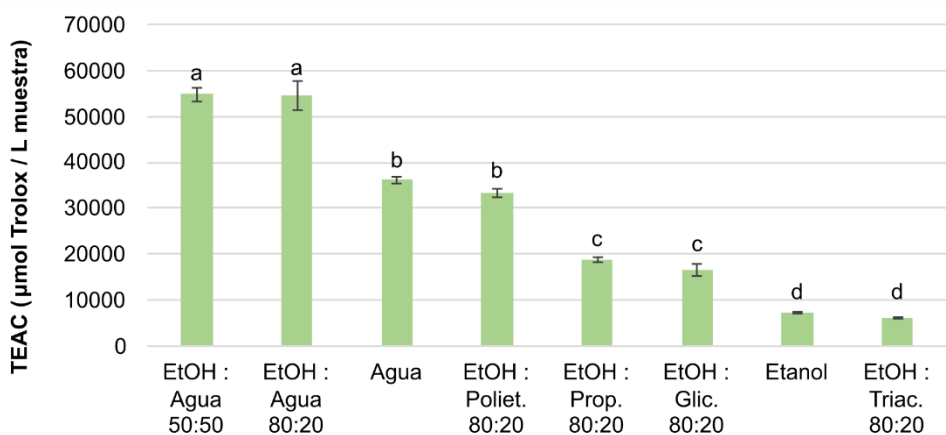


Figura 3-21. Determinación de la capacidad antioxidante ABTS para los extractos.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

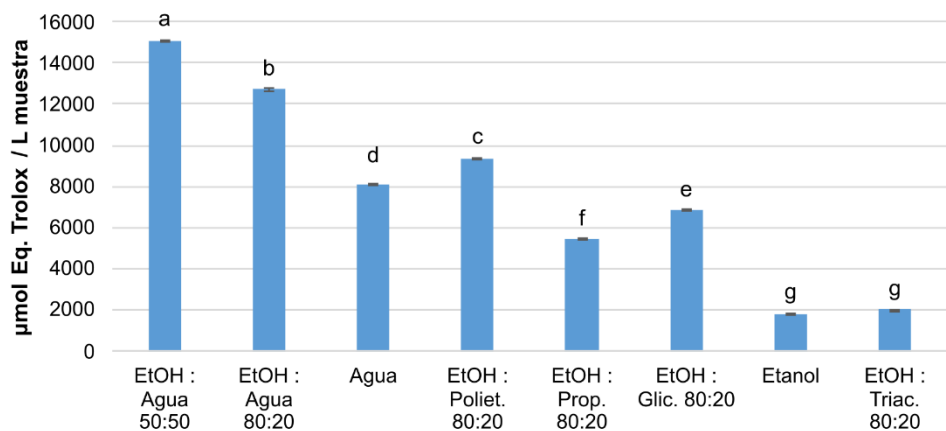


Figura 3-22. Determinación de la capacidad reductora FRAP para los extractos.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

3.3.2 Preparación del extracto en polvo

Los productos secos presentaron diferencias en el aspecto con respecto a las diversas adiciones de maltodextrina (Figura 3-23), para los niveles más bajos (0% y 2.5%) se

presenta una apariencia pegajosa y de apelmazamiento, lo que sería un inconveniente durante el almacenamiento y en el momento de incorporarlo en diferentes matrices alimenticias. Por otro lado, en los casos con una mayor adicción del agente encapsulante, se obtuvieron productos con mejores propiedades físicas, como una menor aglomeración e higroscopicidad, cualidades convenientes para su aplicación posterior. Sin embargo, en este estudio estos productos no fueron caracterizados, se recomienda realizar una evaluación más profunda de las propiedades y estabilidad de estos.

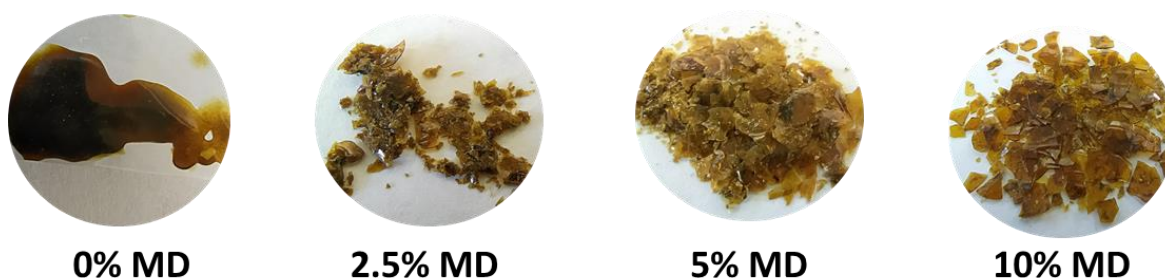


Figura 3-23. Extractos secos con diferentes proporciones de maltodextrina.

Por otro lado, el contenido de polifenoles también fue evaluado en los productos secos, como se muestra en la Figura 3-24. Con base en estos valores, se determinó que si bien en mayores niveles de adicción de maltodextrina al extracto, el producto en polvo obtenido luego del secado presentó mejores características físicas como mayor fluidez, se presenta un efecto de dilución de estos componentes polifenólicos. En consecuencia, es necesario tener un balance para conseguir un producto con un alto valor de compuestos bioactivos y con características adecuadas que favorezcan su posterior implementación en diferentes matrices alimentarias. De acuerdo con esto, se determinó que el nivel de adicción de maltodextrina al 5% fue el más adecuado entre los evaluados, ya que presentó un equilibrio entre un producto con baja tendencia a la aglomeración y un alto contenido de polifenoles de 3146.75 ± 244.08 mg EAG/100 g de extracto en polvo.

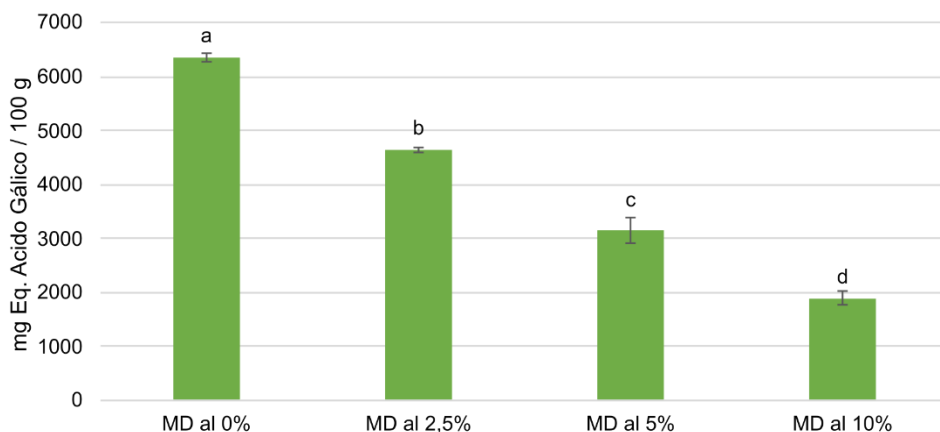


Figura 3-24. Determinación del contenido de polifenoles para los extractos secos.

Los valores son obtenidos mediante el promedio de tres repeticiones y la desviación estándar es representada por las barras de error. Los resultados con una letra en común no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

Finalmente, para la obtención del producto en polvo, el extracto seco fue pulverizado empleando un mortero y tamizado empleando un tamiz malla 60 (U.S. mesh) logrando un producto fino con un tamaño de partícula inferior a 250 μm (Figura 3-25).



Figura 3-25. Extracto deshidratado y en polvo de moringa.

3.3.3 Análisis antioxidante a la bebida láctea suplementada con extracto de moringa

El lactosuero o suero dulce es un subproducto resultante del proceso de elaboración de queso, por cada diez partes de leche empleadas se produce una parte de queso y nueve partes de suero (Królczyk et al., 2016). En Colombia la generación de este subproducto para el año 2013 fue estimada en 2033 millones de litros, de los cuales aproximadamente el 70% fue destinado en alimentación animal o vertido como efluente líquido (Castells et al., 2017). El lactosuero se compone de 93% agua, 5% lactosa, 0.85% proteína, 0.53% minerales y 0.36% de grasa, conteniendo 1000 L de lactosuero las cantidades equivalentes para cumplir con los requerimientos diarios de proteína y energía para 130 y más de 100 personas, respectivamente (Molero-Méndez et al., 2017). Con el objetivo de dar un aprovechamiento a esta materia prima y de disminuir la contaminación ambiental asociada cuando se descarta en los afluentes, se han realizado numerosos esfuerzos para la elaboración de alimentos de alta calidad y agradable sabor, entre estos alimentos, las bebidas refrescantes y fermentadas son las que mayor aceptación han presentado (Abdulalim et al., 2018).

En este trabajo se realizó una bebida láctea fermentada empleando lactosuero, inoculada con microorganismos probióticos y suplementada con un extracto en polvo obtenido a partir de hojas de moringa. En la Figura 3-26 se presenta la bebida láctea elaborada con la inclusión de diferentes concentraciones del extracto en polvo.



Figura 3-26. Bebida láctea con incorporación del extracto en polvo.

Los resultados de las evaluaciones antioxidantes, realizadas para la bebida láctea con la incorporación de diferentes concentraciones del extracto de moringa en polvo, son presentadas en la Tabla 3-6. Se observa que los efectos en la concentración de polifenoles totales de la bebida láctea, al igual que su capacidad reductora, son aditivos con respecto a la concentración del extracto de moringa en polvo adicionado. Para el contenido de polifenoles se alcanzó un aumento del 35.5% en la bebida láctea con la mayor incorporación del extracto, respecto al control, mientras que para la capacidad reductora se logró un aumento del 114.2%.

Tabla 3-6. Contenido de polifenoles y capacidad reductora bebida con extracto en polvo.

Concentración de adición del extracto	Contenido de polifenoles totales (mg EAG/L bebida)	Capacidad reductora FRAP ($\mu\text{mol ET / L bebida}$)
0 (control)	215.14 \pm 6.15 ^a	402.22 \pm 0.72 ^a
0.5 g/L	227.51 \pm 4.84 ^{ab}	464.46 \pm 7.46 ^b
1.0 g/L	236.33 \pm 1.92 ^b	583.43 \pm 14.62 ^c
1.5 g/L	258.93 \pm 5.95 ^c	761.19 \pm 3.77 ^d
2.0 g/L	291.58 \pm 4.34 ^d	861.61 \pm 38.57 ^e

Los valores fueron obtenidos evaluando tres repeticiones y se presentan como promedio \pm desviación estándar. Los valores en la misma columna con la misma letra no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba DSH de Tukey ($p < 0.05$).

3.3.4 Aceptación sensorial de la bebida láctea

Las pruebas de aceptación son un componente importante que permite determinar el nivel de aprobación de un producto por parte de los consumidores, indicando generalmente la preferencia del producto (compra y consumo) (Ramírez-Navas, 2012). En la Tabla 3-7 se presentan los valores para cada atributo evaluado en las dos formulaciones de bebida láctea, (control y 0.1 g/L de extracto), se destaca que no se presentaron grandes diferencias entre las formulaciones, esta observación es claramente apreciada en el gráfico de red presentado (Figura 3-27). Los valores de aceptabilidad general fueron de 6.1 y 5.8 (sobre una escala del 1 al 7) para la bebida control y la adicionada con el extracto, respectivamente. Estos valores, al igual que los obtenidos para los demás atributos, son correspondientes a un alto nivel de agrado por parte de los consumidores (“me gusta mucho”), según la escala evaluada.

Tabla 3-7. Resultados evaluación sensorial bebida láctea.

Atributo	Control	Bebida suplementada
Color	5.6 ± 1.1	5.6 ± 1.0
Olor	5.6 ± 1.2	5.4 ± 0.2
Sabor	6.0 ± 1.1	5.9 ± 0.9
Textura	6.1 ± 2.0	5.8 ± 1.0
Acidez	5.7 ± 1.0	5.5 ± 1.0
Aceptación general	6.1 ± 0.9	5.8 ± 0.9

Los valores corresponden al promedio de los datos ± desviación estándar.

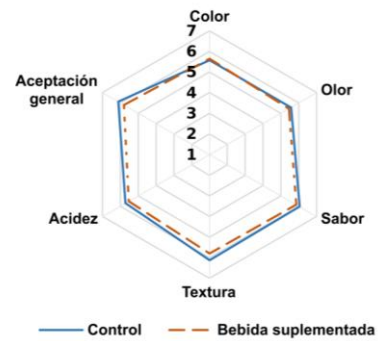


Figura 3-27. Gráfico de red - evaluación sensorial

Conclusiones

En este trabajo se evaluó el efecto en la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes del secado por medio de cuatro diferentes métodos (solar, convectivo, microondas y liofilización) para las hojas de *M. oleifera*. En cada uno de los procesos de deshidratación se obtuvieron valores de humedad inferiores al 10 %, adecuados para propiciar una mayor estabilidad y conservación de las hojas.

La velocidad de secado en los procesos convectivo y por microondas incrementó con el aumento de la energía empleada en cada caso, es decir, temperatura y potencia de las microondas, respectivamente.

Se evidenció que para las hojas de moringa no se presentó la etapa constante de velocidad de secado, así, se concluye que la cinética en este proceso fue controlada por los fenómenos de difusión y efecto capilar, asociados a la transferencia de masa.

El modelo cinético de *Logistics* fue el que mejor ajustó los datos experimentales en los procesos de secado, tanto para el caso convectivo como por microondas, presentando los valores más bajos para RMSE y SSE.

El proceso por microondas permitió una reducción de hasta el 93 % del tiempo de secado a la potencia de 900 W, con respecto al secado convectivo evaluado a 80°C. Permitiendo destacar las ventajas asociadas a esta tecnología, como son una alta velocidad de secado, disipación uniforme de la energía y calentamiento volumétrico en las hojas. Lo anterior también se evidencia mediante la comparación de los mayores valores de difusividad alcanzados en cada caso, los cuales fueron de 5.671×10^{-11} y 7.900×10^{-10} m²/s, para secado convectivo y en microondas, respectivamente.

La temperatura en el secado convectivo presentó un comportamiento variable en relación con la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes evaluados. Esto fue causado por la variación de la temperatura empleada y su relación con el tiempo de secado. Una temperatura adecuada a utilizar sería 70°C, ya que no presenta diferencias significativas con los valores más altos obtenidos en los análisis antioxidantes a las diferentes temperaturas, lo cual si ocurre para el proceso a 80°C en el contenido de polifenoles y la capacidad reductora FRAP. Además, la condición seleccionada presenta como ventaja un tiempo de secado relativamente corto.

La potencia de secado en el microondas presento un efecto significativo en la capacidad antioxidante y el contenido de metabolitos antioxidantes para las hojas de moringa, los valores de todos los análisis antioxidantes realizados fueron mayores para las potencias más altas (900 y 720 W) en comparación con los obtenidos para las inferiores (360 y 540 W). Además, los procesos con potencias altas disminuyeron significativamente el tiempo de secado, obteniendo que el secado por microondas a 900 o 720 W son métodos de secado adecuados que favorecen la conservación de los metabolitos antioxidantes (polifenoles y flavonoides) y la capacidad antioxidante asociada a estos.

En general, el proceso con microondas a 360 W fue el tratamiento que ocasionó mayor degradación en los análisis antioxidantes para las hojas de moringa, mientras que liofilización, microondas a 720 W y microondas a 900 W fueron los que propiciaron una mayor conservación de sus propiedades antioxidantes.

Finalmente, el extracto en polvo obtenido presentó un alto contenido de compuestos polifenólicos, que al aplicarlo en una bebida láctea aumentó significativamente la capacidad reductora de esta, manteniendo una muy buena aceptación sensorial, es así como se evidencia su gran potencial para ser incluido en diversas matrices alimenticias.

Bibliografía

- Abdulalim, T. S., Zayan, A. F., Campelo, P. H., & Bakry, A. M. (2018). Development of new functional fermented product: mulberry-whey beverage. *Journal of Nutrition, Food Research and Technology*, 1(3), 64–69. <https://doi.org/10.30881/jnfrt.00013>
- Abdullah, S., Shaari, A. R., & Azimi, A. (2012). Effect of Drying Methods on Metabolites Composition of Misai Kucing (*Orthosiphon stamineus*) Leaves. *APCBEE Procedia*, 2, 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.06.032>
- Ademiluyi, A. O., Aladeselu, O. H., Oboh, G., & Boligon, A. A. (2018). Drying alters the phenolic constituents, antioxidant properties, α -amylase, and α -glucosidase inhibitory properties of Moringa (*Moringa oleifera*) leaf. *Food Science and Nutrition*, 6(8), 2123–2133. <https://doi.org/10.1002/fsn3.770>
- Ali, M. A., Yusof, Y. A., Chin, N. L., Ibrahim, M. N., & Basra, S. M. A. (2014). Drying Kinetics and Colour Analysis of *Moringa Oleifera* Leaves. *Italian Oral Surgery*, 2, 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.055>
- Amaglo, N. K., Bennett, R. N., Lo Curto, R. B., Rosa, E. A. S., Lo Turco, V., Giuffrida, A., Curto, A. Lo, Crea, F., & Timpo, G. M. (2010). Profiling selected phytochemicals and nutrients in different tissues of the multipurpose tree *Moringa oleifera* L., grown in Ghana. *Food Chemistry*, 122(4), 1047–1054. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.073>
- Amini, G., Salehi, F., & Rasouli, M. (2022). Color changes and drying kinetics modeling of basil seed mucilage during infrared drying process. *Information Processing in Agriculture*, 9(3), 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.07.001>
- Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., & Gilani, A. H. (2007). *Moringa oleifera*: a food plant with multiple medicinal uses. *Phytotherapy Research*, 21(1), 17–25. <https://doi.org/10.1002/ptr.2023>
- AOAC. (2005). AOAC-Association of official analytical chemists. *Official Methods of*

Analysis of AOAC International 18th Ed, Gaithersburg, Maryland, USA, 45, 75–76.

- Ataei, A., Sadeghi, M., Beheshti, B., Minaei, S., & Hamdami, N. (2015). Vibro-fluidized bed heat pump drying of mint leaves with respect to phenolic content, antioxidant activity, and color indices. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 21(2)*, 239–247. <https://doi.org/10.2298/CICEQ131206021A>
- Babiker, E. E., Juhaimi, F. A. L., Ghafoor, K., & Abdoun, K. A. (2016). Effect of drying methods on nutritional quality of young shoots and leaves of two Moringa species as non-conventional fodders. *Agroforestry Systems, 92(3)*, 717–729. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0043-8>
- Bélanger, J. M. R., Paré, J. R. J., Poon, O., Fairbridge, C., Ng, S., Mutyala, S., & Hawkins, R. (2008). Remarks on various applications of microwave energy. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 42(4)*, 24–44. <https://doi.org/10.1080/08327823.2007.11688597>
- Bensebia, O., & Allia, K. (2015). Drying and extraction kinetics of rosemary leaves: Experiments and modeling. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants, 18(1)*, 99–111. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.901620>
- Benzie, I. F. F. (1996). An automated, specific, spectrophotometric method for measuring ascorbic acid in plasma (EFTSA). *Clinical Biochemistry, 29(2)*, 111–116. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-9120\(95\)02013-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-9120(95)02013-6)
- Bhatta, S., Janezic, T. S., & Ratti, C. (2020). Freeze-drying of plant-based foods. *Foods, 9(1)*, 1–22. <https://doi.org/10.3390/foods9010087>
- Biswas, A., Hoque, T., & Abedin, M. (2016). Effects of moringa leaf extract on growth and yield of maize. *Progressive Agriculture, 27(2)*, 136–143. <https://doi.org/10.3329/pa.v27i2.29322>
- Caccavale, P., De Bonis, M. V., & Ruocco, G. (2016). Conjugate heat and mass transfer in drying: A modeling review. *Journal of Food Engineering, 176*, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.031>
- Carrín, M. E., & Crapiste, G. H. (2008). Convective drying of foods. In *Advances in food dehydration*. CRC Press, Boca Raton.

- Castells, M. L., González, M., Mattos, C., Juliano, P., Mellinger, C., Sepulveda, J. U., Jorcín, S., Krolow, A. C., Di Risio, J., & López, T. (2017). Valorización del lactosuero. In *Alternativas de valorización de sueros de quesería*.
- Castro Márquez, A. M. (2013). *El árbol moringa (Moringa oleífera Lam.): una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicos y ambientales de Colombia*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing-A review. *Food Research International*, 52(1), 243–261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>
- Coppin, J. P., Xu, Y., Chen, H., Pan, M. H., Ho, C. T., Juliani, R., Simon, J. E., & Wu, Q. (2013). Determination of flavonoids by LC/MS and anti-inflammatory activity in *Moringa oleífera*. *Journal of Functional Foods*, 5(4), 1892–1899. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.09.010>
- Cory, H., Passarelli, S., Szeto, J., Tamez, M., & Mattei, J. (2018). The Role of Polyphenols in Human Health and Food Systems: A Mini-Review. *Frontiers in Nutrition*, 5(September), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00087>
- Costa-Pinto, R., & Gantner, D. (2020). Macronutrients, minerals, vitamins and energy. *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, 21(3), 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2019.12.006>
- Crank, J. (1975). *the Mathematics of Diffusion Clarendon Press Oxford 1975*. 3–4.
- Damodaran, S., & Parkin, K. L. (2017). Fennema's Food Chemistry, Fifth Edition. In *Fennema's Food Chemistry, Fifth Edition*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372914>
- Dania, Oladebeye, Olukoya, & Adejumo, P. O. (2018). Effect of Different Drying Methods on Proximate Composition of *Moringa Oleífera* Leaves. *Management, Science & Technology (JAMST)*, 5(1).
- Das, S., Mukhopadhyay, A. K., Datta, S., & Basu, D. (2009). Prospects of microwave processing: An overview. *Bulletin of Materials Science*, 32(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12034-009-0001-4>

- Degot, P., Huber, V., Hofmann, E., Hahn, M., Touraud, D., & Kunz, W. (2021). Solubilization and extraction of curcumin from *Curcuma longa* using green, sustainable, and food-approved surfactant-free microemulsions. *Food Chemistry*, 336, 127660. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127660>
- Demirhan, E., & Özbek, B. (2011). Thin-layer drying characteristics and modeling of celery leaves undergoing microwave treatment. *Chemical Engineering Communications*, 198(7), 957–975. <https://doi.org/10.1080/00986445.2011.545298>
- Dent, M., Dragović-Uzelac, V., Penić, M., Brnić, M., Bosiljkov, T., & Levaj, B. (2013). The effect of extraction solvents, temperature and time on the composition and mass fraction of polyphenols in dalmatian wild sage (*Salvia officinalis* L.) extracts. *Food Technology and Biotechnology*, 51(1), 84–91.
- Dev, S. R. S., Geetha, P., Orsat, V., Gariépy, Y., & Raghavan, G. S. V. (2011). Effects of microwave-assisted hot air drying and conventional hot air drying on the drying kinetics, color, rehydration, and volatiles of *Moringa oleifera*. *Drying Technology*, 29(12), 1452–1458. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.587926>
- Domínguez, R., Pateiro, M., Gagaoua, M., Barba, F. J., Zhang, W., & Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10), 1–31. <https://doi.org/10.3390/antiox8100429>
- Dong, J., Ma, X., Fu, Z., & Guo, Y. (2011). Effects of microwave drying on the contents of functional constituents of *Eucommia ulmoides* flower tea. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1102–1110. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.03.026>
- Doymaz, İ. (2017a). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer*, 53(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>
- Doymaz, İ. (2017b). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 53(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8>
- Doymaz, I., & Karasu, S. (2018). Effect of air temperature on drying kinetics, colour changes and total phenolic content of sage leaves (*Salvia officinalis*). *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, 10(3), 269–276. <https://doi.org/10.3920/QAS2017.1257>

- Doymaz, İ., Tugrul, N., & Pala, M. (2006). Drying characteristics of dill and parsley leaves. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.070>
- Erbay, Z., & Icier, F. (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 91(4), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.004>
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- Fang, S., Wang, Z., & Hu, X. (2009). Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): thin-layer mathematical modelling. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(9), 1818–1824. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02005.x>
- Feng, H., Yin, Y., & Tang, J. (2012). Microwave Drying of Food and Agricultural Materials: Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Engineering Reviews*, 4(2), 89–106. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9048-x>
- Foidl, N., Makkar, H., & Becker, K. (2001). the Potential of *Moringa oleifera*. *Dar Es Salaam*, 20.
- Gandji, K., Chadare, F. J., Idohou, R., Salako, V. K., Assogbadjo, A. E., & Kakai, R. L. G. (2018). Status and utilisation of *Moringa oleifera* Lam: A review. *African Crop Science Journal*, 26(1), 137. <https://doi.org/10.4314/acsj.v26i1.10>
- Ganiari, S., Choulitoudi, E., & Oreopoulou, V. (2017). Edible and active films and coatings as carriers of natural antioxidants for lipid food. *Trends in Food Science and Technology*, 68, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.009>
- Giri, S. K., & Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 512–521. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.021>
- Glover-Amengor, M., & Mensah, F. (2012). Nutritional evaluation of *Moringa oleifera* leaves using three drying methods. *Journal of Research in Biology*, 2(5), 469–473.
- González-Romero, J., Arranz-Arranz, S., Verardo, V., García-Villanova, B., & Guerra-

- Hernández, E. J. (2020). Bioactive compounds and antioxidant capacity of moringa leaves grown in Spain versus 28 leaves commonly consumed in pre-packaged salads. *Processes*, 8(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/pr8101297>
- Griesbach, R. J. (2010). *Biochemistry and genetics of flower color*.
- Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview. In *Archives of Toxicology* (Vol. 94, Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3>
- Hatch, M., & de Silva, C. (2013). *Handbook of food powders: Processes and properties*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1201/9781420053203.bmatt>
- Hihat, S., Remini, H., & Madani, K. (2017). Effect of oven and microwave drying on phenolic compounds and antioxidant capacity of coriander leaves. *International Food Research Journal*, 24(2), 503–509.
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 08(02), 27–48. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>
- Jayawardana, B. C., Liyanage, R., Lalantha, N., Iddamalgoda, S., & Weththasinghe, P. (2015). Antioxidant and antimicrobial activity of drumstick (*Moringa oleifera*) leaves in herbal chicken sausages. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 1204–1208. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.028>
- Jeni, K., Yapa, M., & Rattanadecho, P. (2010). Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (case study: tea leaves). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(4), 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.03.003>
- Ju, H. Y., El-Mashad, H. M., Fang, X. M., Pan, Z., Xiao, H. W., Liu, Y. H., & Gao, Z. J. (2016). Drying characteristics and modeling of yam slices under different relative humidity conditions. *Drying Technology*, 34(3), 296–306. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1052082>
- Kaleta, A., Górnicki, K., Winiczenko, R., & Chojnacka, A. (2013). Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer. *Energy Conversion and Management*, 67, 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.11.011>

- Karimi, F., Rafiee, S., Taheri-Garavand, A., & Karimi, M. (2012). Optimization of an air drying process for *Artemisia absinthium* leaves using response surface and artificial neural network models. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(1), 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.04.005>
- Khodja, Y. K., Dahmoune, F., Bey, M. B., Madani, K., & Khettal, B. (2020). Conventional method and microwave drying kinetics of *Laurus nobilis* leaves: Effects on phenolic compounds and antioxidant activity. *Brazilian Journal of Food Technology*, 23, 1–10. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.21419>
- Komonsing, N., Khuwijtjaru, P., Nagle, M., Müller, J., & Mahayothee, B. (2022). Effect of drying temperature together with light on drying characteristics and bioactive compounds in turmeric slice. *Journal of Food Engineering*, 317(November 2020), 110695. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110695>
- Królczyk, J. B., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., & Sołowiej, B. (2016). Use of Whey and Whey Preparations in the Food Industry - A Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 66(3), 157–165. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>
- Kubra, I. R., & Rao, L. J. M. (2012). Microwave drying of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) and its effects on polyphenolic content and antioxidant activity. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(11), 2311–2317. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03104.x>
- Kumar, C., & Karim, M. A. (2019). Microwave-convective drying of food materials: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(3), 379–394. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>
- Kumar, S., & Pandey, A. K. (2013). Chemistry and Biological Activities of Flavonoids: An Overview. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2013/162750>
- Lakey-Beitia, J., Burillo, A. M., La Penna, G., Hegde, M. L., & Rao, K. S. (2020). Polyphenols as Potential Metal Chelation Compounds Against Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's Disease*, 1–23. <https://doi.org/10.3233/jad-200185>
- LeJeune, T. M., Tsui, H. Y., Parsons, L. B., Miller, G. E., Whitted, C., Lynch, K. E., Ramsauer, R. E., Patel, J. U., Wyatt, J. E., Street, D. S., Adams, C. B., McPherson,

- B., Tsui, H. M., Evans, J. A., Livesay, C., Torrenegra, R. D., & Palau, V. E. (2015). Mechanism of Action of Two Flavone Isomers Targeting Cancer Cells with Varying Cell Differentiation Status. *PLoS ONE*, *10*(11), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142928>
- Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., & Bertoli, S. (2015). Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of *Moringa oleifera* leaves: An overview. *International Journal of Molecular Sciences*, *16*(6), 12791–12835. <https://doi.org/10.3390/ijms160612791>
- Limon, D. I., Mendieta, L., & Luna, F. (2010). Los Flavonoides : Mecanismo De Acción , Neuroprotección Y Efectos. *Mensaje Bioquímico*, *XXXIV*(March), 143–154.
- Liñan Tobias, F. (2010). *Moringa oleifera* el árbol de la nutrición. *Ciencia y Salud Virtual*, *2*(1), 130–138.
- Liu, Y., Wang, X., Wei, X., Gao, Z., & Han, J. (2018). Values, properties and utility of different parts of *Moringa oleifera*: An overview. *Chinese Herbal Medicines*, *10*(4), 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.chmed.2018.09.002>
- López-Vidaña, E. C., Pilatowsky Figueroa, I., Cortés, F. B., Rojano, B. A., & Navarro Ocaña, A. (2017). Effect of temperature on antioxidant capacity during drying process of mortiño (*Vaccinium meridionale* Swartz). *International Journal of Food Properties*, *20*(2), 294–305. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1155601>
- Losada-Barreiro, S., & Bravo-Díaz, C. (2017). Free radicals and polyphenols: The redox chemistry of neurodegenerative diseases. *European Journal of Medicinal Chemistry*, *133*, 379–402. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2017.03.061>
- Lozano-Castellanos, L. F. (2019). *Composición del aceite de semilla de Moringa oleifera y evaluación de la sostenibilidad para su implementación como cultivo agroforestal en Colombia*. Universidad de Valladolid.
- Madi, N., Dany, M., Abdoun, S., & Usta, J. (2016). *Moringa oleifera* 's Nutritious Aqueous Leaf Extract Has Anticancerous Effects by Compromising Mitochondrial Viability in an ROS-Dependent Manner. *Journal of the American College of Nutrition*, *35*(7), 604–613. <https://doi.org/10.1080/07315724.2015.1080128>
- Maleki, S. J., Crespo, J. F., & Cabanillas, B. (2019). Anti-inflammatory effects of flavonoids.

- Food Chemistry*, 299(July). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125124>
- Mallenakuppe, R., Homabalegowda, H., Gouri, M. D., Basavaraju, P. S., & Chandrashekharaiyah, U. B. (2019). History, Taxonomy and Propagation of *Moringa oleifera*-A Review. *SSR Institute of International Journal of Life Sciences*, 5(3), 2322–2327. <https://doi.org/10.21276/ssr-ijls.2019.5.3.7>
- Manach, C., Scalbert, A., Morand, C., Rémésy, C., & Jiménez, L. (2004). Polyphenols: Food sources and bioavailability. *American Journal of Clinical Nutrition*, 79(5), 727–747. <https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>
- Marinova, D., Ribarova, F., & Atanassova, M. (2005). *Total Phenolics and Total Flavonoids in Bulgarian Fruits and Vegetables*. 255–260.
- McBurney, R. P. H., Griffin, C., Paul, A. A., & Greenberg, D. C. (2004). The nutritional composition of African wild food plants: From compilation to utilization. *Journal of Food Composition and Analysis*, 17(3–4), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2004.03.008>
- Meda, V., Orsat, V., & Raghavan, V. (2017). Microwave heating and the dielectric properties of foods. In *The Microwave Processing of Foods: Second Edition* (Second Edi). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100528-6.00002-4>
- Mello, P. A., Barin, J. S., & Guarnieri, R. A. (2014). Microwave Heating. In *Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Determination*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59420-4.00002-7>
- Mishra, R. R., & Sharma, A. K. (2016). Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 81, 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.10.035>
- Molero-Méndez, M. S., Flores-Rondón, C., Leal-Ramírez, M., & Briñez-Zambrano, W. J. (2017). Sensory evaluation of probiotic fermented beverages based on whey. *Revista Científica de La Facultad de Ciencias Veterinarias de La Universidad Del Zulia*, 27(2), 70–77.
- Mouhoubi, K., Boulekbache-Makhlouf, L., Mehaba, W., Himed-Idir, H., & Madani, K. (2022). Convective and microwave drying of coriander leaves: Kinetics characteristics and

- modeling, phenolic contents, antioxidant activity, and principal component analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 45(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13932>
- Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of industrial drying, fourth edition. In *Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition*. <https://doi.org/10.1201/b17208>
- Mujumdar, A. S., & Law, C. L. (2010). Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 3(6), 843–852. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>
- Mukhopadhyay, S., & Siebenmorgen, T. J. (2018). Effect of airflow rate on drying air and moisture content profiles inside a cross-flow drying column. *Drying Technology*, 36(11), 1326–1341. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1402024>
- Naikwade, P. (2015). Effect of drying methods on nutritional value of some vegetables. *Bioscience Discovery*, 6(January 2015), 80–84.
- Nail, S. L., Jiang, S., Chongprasert, S., & Knopp, S. A. (2002). Fundamentals of Freeze-Drying BT - Development and Manufacture of Protein Pharmaceuticals. *Development and Manufacture of Protein Pharmaceuticals*, 14(Chapter 6), 281–360.
- Nanda, A., Mohapatra, D. B. B., Mahapatra, A. P. K., Mahapatra, A. P. K., & Mahapatra, A. P. K. (2021). Multiple comparison test by Tukey's honestly significant difference (HSD): Do the confident level control type I error. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 6(1), 59–65. <https://doi.org/10.22271/math.2021.v6.i1a.636>
- Nasri, M. Y., & Belhamri, A. (2018). Effects of the climatic conditions and the shape on the drying kinetics, Application to solar drying of potato-case of Maghreb's region. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1241–1251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.103>
- Ng, Z. X., Yong, P. H., & Lim, S. Y. (2020). Customized drying treatments increased the extraction of phytochemicals and antioxidant activity from economically viable medicinal plants. *Industrial Crops and Products*, 155(April), 112815. <https://doi.org/10.1242/jeb.02490>
- Nireesha, G., Divya, L., Sowmya, C., Venkateshan, N., Niranjana Babu, M., & Lavakumar, V. (2013). Lyophilization/Freeze Drying -An Review. *Ijntps*, 3(4), 87–98.
- Nobossé, P., Fombang, E. N., & Mbofung, C. M. F. (2018). Effects of age and extraction

- solvent on phytochemical content and antioxidant activity of fresh *Moringa oleifera* L. leaves. *Food Science and Nutrition*, 6(8), 2188–2198. <https://doi.org/10.1002/fsn3.783>
- Nouman, W., Basra, S. M. A., Siddiqui, M. T., Yasmeen, A., Gull, T., & Alcayde, M. A. C. (2014). Potential of *Moringa oleifera* L. as livestock fodder crop: A review. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 38(1), 1–14. <https://doi.org/10.3906/tar-1211-66>
- Nourhène, B., Mohammed, K., & Nabil, K. (2008). Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. *Food and Bioproducts Processing*, 86(3), 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2007.10.001>
- Oldoni, T. L. C., dos Santos, S., Mitterer-Daltoé, M. L., Pizone, L. H. I., & Lima, V. A. de. (2022). *Moringa oleifera* leaves from Brazil: Influence of seasonality, regrowth age and, region in biochemical markers and antioxidant potential. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(11), 104206. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104206>
- Olson, M. E., & Fahey, J. W. (2011). *Moringa oleifera*: Un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(4), 1071–1082. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.4.678>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2017). Color change kinetics and total carotenoid content of pumpkin as affected by drying temperature. *Italian Journal of Food Science*, 29(1), 1–18. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v398>
- Onwude, Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599–618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
- Orphanides, A., Goulas, V., & Gekas, V. (2016). Drying Technologies: Vehicle to High-Quality Herbs. *Food Engineering Reviews*, 8(2), 164–180. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9128-9>
- Oyeyinka, A. T., & Oyeyinka, S. A. (2018). *Moringa oleifera* as a food fortificant: Recent trends and prospects. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.002>
- Pakade, V., Cukrowska, E., & Chimuka, L. (2013). Comparison of antioxidant activity of *Moringa oleifera* and selected vegetables in South Africa. *South African Journal of*

- Science*, 109(3–4), 1–5. <https://doi.org/10.1590/sajs.2013/1154>
- Panche, A. N., Diwan, A. D., & Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science*, 5. <https://doi.org/10.1017/jns.2016.41>
- Pereira, J. M. G., Viell, F. L. G., de Lima, P. C., Silva, E., Pilau, E. J., Corrêa, R. C. G., Bona, E., & Vieira, A. M. S. (2021). Optimization of the extraction of antioxidants from *Moringa* leaves: A comparative study between ultrasound- and ultra-homogenizer-assisted extractions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15512>
- Pirbalouti, A. G., Salehi, S., & Craker, L. (2017). Effect of drying methods on qualitative and quantitative properties of essential oil from the aerial parts of coriander. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 4, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.07.006>
- Potisate, Y., Science, S. P.-A.-P. J. of, & 2015, U. (2015). Microwave drying of *Moringa oleifera* (Lam.) leaves: drying characteristics and quality aspects. *So01.Tci-Thaijo.Org*, 20(1), 12–25.
- Premi, M., Sharma, H., & Upadhyay, A. (2012). Effect of air velocity and temperature on the drying kinetics of drumstick leaves (*Moringa oleifera*). *International Journal of Food Engineering*, 8(4). <https://doi.org/10.1515/1556-3758.1986>
- Pu, H., Li, Z., Hui, J., & Raghavan, G. S. V. (2016). Effect of relative humidity on microwave drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 190, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.06.027>
- Putra, R. N., & Ajiwiguna, T. A. (2017). Influence of Air Temperature and Velocity for Drying Process. *Procedia Engineering*, 170, 516–519. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.082>
- Puttalingappa, Y. J., Natarajan, V., Varghese, T., & Naik, M. (2022). Effect of microwave-assisted vacuum drying on the drying kinetics and quality parameters of *Moringa oleifera* leaves. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14054>
- Rababah, T. M., Al-U' Datt, M., Alhamad, M., Al-Mahasneh, M., Ereifej, K., Andrade, J., Altarifi, B., Almajwal, A., & Yang, W. (2015). Effects of drying process on total

- phenolics, antioxidant activity and flavonoid contents of common mediterranean herbs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(2), 145–150. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150802.1496>
- Ramírez-Navas, J. S. (2012). Análisis sensorial: pruebas orientadas al consumidor. *Revista RECITEIA*, 12(1), 83–102.
- Ramsumair, A., Mlambo, V., & Lallo, C. H. O. (2014). Effect of drying method on the chemical composition of leaves from four tropical tree species. *Tropical Agriculture*, 91(3), 179–186.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
- Ribaudo, G., Povolo, C., & Zagotto, G. (2019). *Moringa oleifera* Lam.: A Rich Source of Phytoactives for the Health of Human Being. In *Studies in Natural Products Chemistry* (1st ed., Vol. 62). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64185-4.00005-8>
- Rocha, R. P., Melo, E. C., & Radünz, L. L. (2011). Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *Journal of Medicinal Plant Research*, 5(33), 7076–7084. <https://doi.org/10.5897/JMPRx11.001>
- Rodríguez-Pérez, C., Quirantes-Piné, R., Fernández-Gutiérrez, A., & Segura-Carretero, A. (2015). Optimization of extraction method to obtain a phenolic compounds-rich extract from *Moringa oleifera* Lam leaves. *Industrial Crops and Products*, 66, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.002>
- Saini, R. K., Shetty, N. P., Prakash, M., & Giridhar, P. (2014). Effect of dehydration methods on retention of carotenoids, tocopherols, ascorbic acid and antioxidant activity in *Moringa oleifera* leaves and preparation of a RTE product. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2176–2182. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1264-3>
- Santos, A., Argolo, A. C. C., Paiva, P. M. G., & Coelho, L. C. B. B. (2012). Antioxidant activity of *Moringa oleifera* tissue extracts. *Phytotherapy Research : PTR*, 26(9), 1366–1370. <https://doi.org/10.1002/ptr.4591>
- Santos, C. H. K., Baqueta, M. R., Coqueiro, A., Dias, M. I., Barros, L., Barreiro, M. F.,

- Ferreira, I. C. F. R., Gonçalves, O. H., Bona, E., da Silva, M. V., & Leimann, F. V. (2018). Systematic study on the extraction of antioxidants from pinhão (*Araucaria angustifolia* (bertol.) Kuntze) coat. *Food Chemistry*, 261, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.057>
- Saucedo-Pompa, S., Torres-Castillo, J. A., Castro-López, C., Rojas, R., Sánchez-Alejo, E. J., Ngangyo-Heya, M., & Martínez-Ávila, G. C. G. (2018). Moringa plants: Bioactive compounds and promising applications in food products. *Food Research International*, 111(May), 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.062>
- Selvi, K. Ç. (2020). Investigating the influence of infrared drying method on linden (*Tilia platyphyllos* scop.) leaves: Kinetics, color, projected area, modeling, total phenolic, and flavonoid content. *Plants*, 9(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/plants9070916>
- Şevik, S. (2014). Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. *Solar Energy*, 105, 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.037>
- Shahidi, F. (2015). Handbook of Antioxidants for Food Preservation. In B. J. F. Hudson (Ed.), *Handbook of Antioxidants for Food Preservation* (Vol. 162, Issue 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16454-9>
- Shinde, A., Das, S., & Datta, A. K. (2013). Quality improvement of orthodox and CTC tea and performance enhancement by hybrid hot air-radio frequency (RF) dryer. *Journal of Food Engineering*, 116(2), 444–449. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.001>
- Shivanna, V. B., & Subban, N. (2014). Effect of Various Drying Methods on Flavor Characteristics and Physicochemical Properties of Dried Curry Leaves (*Murraya koenigii* L. Spreng). *Drying Technology*, 32(8), 882–890. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.871727>
- Shukla, S. (2011). Freeze drying process: A review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2(12), 3061.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144 LP – 158.
- Siqueira, V. C., Resende, O., & Chaves, T. H. (2012). Drying kinetics of jatropha seeds.

- Revista Ceres*, 59(2), 171–177. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200004>
- Śledź, M., Nowacka, M., Wiktor, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2013). Selected chemical and physico-chemical properties of microwave-convective dried herbs. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.02.010>
- Sreelatha, S., & Padma, P. R. (2009). Antioxidant activity and total phenolic content of *Moringa oleifera* leaves in two stages of maturity. *Plant Foods for Human Nutrition*, 64(4), 303–311. <https://doi.org/10.1007/s11130-009-0141-0>
- Srivastava, N., & Bezwada, R. (2015). Flavonoids: The Health Boosters. White Paper. Hillsborough NJ: Indofine Chemical Company.
- Tafesse, A., Goshu, D., Gelaw, F., & Ademe, A. (2020). Commercialization of Moringa: Evidence from Southern Ethiopia. *Cogent Economics and Finance*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/23322039.2020.1783909>
- Telfser, A., & Galindo, F. G. (2019). Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *LWT*, 99(April 2018), 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.062>
- Thamkaew, G., Sjöholm, I., & Galindo, F. G. (2021). A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(11), 1763–1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>
- Thangaraj, P. (2016). Proximate Composition Analysis. In *Progress in Drug Research* (Vol. 71, pp. 21–31). https://doi.org/10.1007/978-3-319-26811-8_5
- Tiloke, C., Anand, K., Gengan, R. M., & Chuturgoon, A. A. (2018). *Moringa oleifera* and their phytonanoparticles: Potential antiproliferative agents against cancer. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 108(September), 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.09.060>
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Ghasemi Pirbalouti, A., & Sadeghi, M. (2016). Dehydration behaviour, mathematical modelling, energy efficiency and essential oil yield of peppermint leaves undergoing microwave and hot air treatments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.078>

- Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaris, D. P. (2014). Case studies on the effect of the air drying conditions on the convective drying of quinces. *Case Studies in Thermal Engineering*, 3, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.05.001>
- Udikala, M., Verma, Y., Sushma, S., & Lal, S. (2017). Phytonutrient and Pharmacological Significance of *Moringa oleifera*. *International Journal of Life-Sciences Scientific Research*, 3(5), 1387–1391. <https://doi.org/10.21276/ijlssr.2017.3.5.21>
- Ullah, A., Munir, S., Badshah, S. L., Khan, N., Ghani, L., Poulson, B. G., Emwas, A., & Jaremko, M. (2020). Important Flavonoids and Their Role as a Therapeutic Agent. *Molecules*, 25(22), 5243. <https://doi.org/10.3390/molecules25225243>
- Valadez-Carmona, L., Plazola-Jacinto, C. P., Hernández-Ortega, M., Hernández-Navarro, M. D., Villarreal, F., Necochea-Mondragón, H., Ortiz-Moreno, A., & Ceballos-Reyes, G. (2017). Effects of microwaves, hot air and freeze-drying on the phenolic compounds, antioxidant capacity, enzyme activity and microstructure of cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41(October 2016), 378–386. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.012>
- Vongsak, B., Sithisarn, P., Mangmool, S., Thongpraditchote, S., Wongkrajang, Y., & Gritsanapan, W. (2013). Maximizing total phenolics, total flavonoids contents and antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaf extract by the appropriate extraction method. *Industrial Crops and Products*, 44(November 2017), 566–571. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.021>
- Yildiz, G., Wehling, R. L., & Cuppett, S. L. (2001). Method for determining oxidation of vegetable oils by near-infrared spectroscopy. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 78(5), 495–502. <https://doi.org/10.1007/s11746-001-0292-1>
- Yilmaz, P., Demirhan, E., & Özbek, B. (2021). Microwave drying effect on drying characteristic and energy consumption of *Ficus carica* Linn leaves. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), 1–21. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13831>
- Zapata, K., Rojano, B. A., & Cortés, F. B. (2015). Effect of Relative Humidity on the Antioxidant Activity of Spray-Dried Banana Passion Fruit (*Passiflora mollissima* Baley)-Coated Pulp: Measurement of the Thermodynamic Properties of Sorption. *Chemical*

- Engineering Communications*, 202(3), 269–278.
<https://doi.org/10.1080/00986445.2013.840829>
- Zeece, M. (2020). Food colorants. In *Introduction to the Chemistry of Food* (pp. 313–344). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809434-1.00008-6>
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 17(10), 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.011>