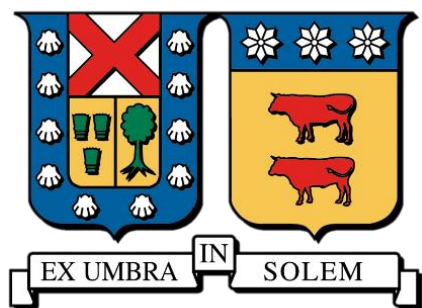


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL  
VALPARAÍSO – CHILE



**“INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDO  
ACOPLADO A LA TECNOLOGÍA DE VENTANA REFRACTIVA  
PARA LA DESHIDRATACIÓN DE PULPA DE TOMATE”**

**CAMILLE DENISSE VEGA GONZÁLEZ**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERA CIVIL QUÍMICA

PROFESOR GUÍA: DR. CRISTIAN RAMIREZ BUSTOS  
PROFESOR CORREFERENTE: DR. SERGIO ALMONACID MERINO

OCTUBRE 2023

## **Agradecimientos**

A mis padres, por haberse esforzado todos estos años en post de mi educación, entregarme las herramientas para estar acá y por motivarme a crecer profesionalmente y como persona.

A mi familia, los que siguen y los que ya no están, por confiar en mis capacidades y creer en mí. Sus palabras de aliento las llevo siempre en mi corazón.

A mi compañera Catalina Mandiola, por su apoyo incondicional y fundamental en este largo camino de aprendizaje y caídas. No hubiese sido capaz de lograr esto sin tu contención, paciencia y ayuda.

A mi profesor guía Cristian Ramírez, por ser de esas personas que inspiran y te motivan a aprender. Gracias por su disposición para responder cada duda que fue surgiendo en estos meses de trabajo y por entregar sonrisas siempre.

A los compañeros/as del laboratorio, que aparecieron en el camino y que hicieron que los días fueran menos monótonos. Especialmente a Jamill Elitin por su paciencia y por brindarme siempre la ayuda cuando lo necesité.

Finalmente, quiero agradecer a un ser que especial para mí que ya no se encuentra acá. Gracias Humi por haber aparecido en mi vida en el momento que más lo necesité, entregarme tu cariño a través de tus ronroneos y acompañarme en las largas noches de estudios. Ojalá todos pudieran sentir y valorar el amor que puede entregar un animal, un abrazo al cielo.

## Resumen

El secado de alimentos corresponde a la operación mediante la cual se elimina el agua de un alimento para prolongar su vida útil. Este proceso normalmente ocurre a altas temperatura o por largos periodos de tiempo, afectando las características organolépticas y propiedades nutricionales de estos, lo cual incide directamente en la decisión de los consumidores al elegir entre un alimento fresco y un producto deshidratado.

Con el paso de los años se han estudiado diversas tecnologías de secado que maximizan la retención de compuestos de alto valor nutritivo y una de ellas corresponde a la ventana refractiva. Ahora bien, para que el proceso tenga una mayor eficiencia se han introducido al mercado otras técnicas como el uso de pretratamientos o el acoplamiento de diversas tecnologías, tales como el microondas, vacío, infrarrojos, ultrasonido, etc.

Respecto a esto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia del ultrasonido en el secado de pulpa de tomate. Para ello se diseñó un sistema de secado basado en ventana refractiva acoplado a ultrasonido, donde se dispuso las muestras en moldes circulares de 3 mm. Se realizaron secados sin y con la aplicación de ultrasonido intermitente, evaluando temperaturas de 70, 80 y 90°C y amplitud de onda de 50 y 100%.

En este sentido, se pudo corroborar que la aplicación del ultrasonido redujo hasta en un 17.4% los tiempos de secado, pasando de 109 a 90 min en la VR 70°C US 100% y de 77 a 64 min en la VR 80°C US 100%. Al trabajar con una amplitud del 50%, el tiempo se redujo en un 6.1% y 4.8% para el secado a 70 y 80°C, respectivamente.

En cuanto a los indicadores de calidad, el contenido de polifenoles promedio en tomate fresco fue de 642 mg GAE/100 g BS, este se redujo entre un 36.8 a 56.5% con la aplicación del ultrasonido, donde la mayor pérdida ocurrió a 80°C con amplitud 50%. Para el caso de la actividad antioxidante, el valor fue de 6663 mg TE/100 g BS para la pulpa de tomate fresca y esta experimentó pérdidas más significativas, que van desde 62.8 a un 73.2%. En esta instancia solo el secado a 70°C con US 100% conservó las mismas concentraciones que el secado con ventana refractiva. En relación al color, las muestras secadas a una menor temperatura y mayor intensidad presentaron un  $\Delta E$  alrededor de 5, logrando un producto con mejor aspecto que en el secado con ventana refractiva por sí solo.

Los resultados obtenidos mediante el estudio de la cinética demuestran que el modelo anómalo presenta un mejor ajuste de los datos que el modelo basado en Fick, siendo capaz de entregar una mejor representación del fenómeno de difusión. Además, la aplicación del ultrasonido aumenta el coeficiente de difusión efectiva a medida que la intensidad aplicada es mayor. Pues, a 70°C el coeficiente de difusión aumentó desde 4.9 a 5.8 y  $8.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}^{1.45}$  para el secado asistido con ultrasonido a 50 y 100%, respectivamente. Asimismo, a 80°C la difusividad efectiva pasó de 7.0 a 7.7 y  $8.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}^{1.45}$ , respectivamente.

Finalmente, el acoplamiento de ultrasonido de alta intensidad permite el secado de alimentos a bajas temperaturas, proporcionando la misma retención de nutrientes en el producto final que la ventana refractiva, pero a menores tiempos y con mejor apariencia.

# Índice

Agradecimientos .....	2
Resumen .....	3
Índice de tablas .....	5
Índice de figuras .....	6
1. Introducción.....	9
1.1. Objetivos.....	11
1.1.1 Objetivo general .....	11
1.1.2 Objetivos específicos .....	11
2. Marco teórico.....	13
2.1 Tomate .....	13
2.2 Composición química del tomate y valor nutricional.....	13
2.3 Compuestos bioactivos del tomate .....	14
2.3.1 Carotenoides .....	14
2.3.2 Compuestos fenólicos.....	15
2.3.3 Compuestos antioxidantes .....	16
2.4 Mercado nacional del tomate .....	16
2.5 Tecnologías de secado .....	17
2.5.1 Ventana refractiva .....	18
2.5.2 Secado asistido por ultrasonido .....	19
2.6 Modelación matemática del mecanismo de difusión para el análisis de la cinética de secado .....	21
2.6.1. Modelo basado en la segunda Ley de Fick.....	22
2.6.2. Modelo anómalo basado en cálculo fraccional.....	23
3. Metodología.....	26
3.1 Materia prima .....	26
3.2 Procedimiento experimental.....	26
3.2.1 Preparación de la materia prima .....	27
3.2.2 Caracterización de la pulpa de tomate.....	27
3.2.3 Secador de ventana refractiva (VR) .....	27
3.2.4 Secador de ventana refractiva con ultrasonido .....	28
3.2.5 Liofilizador (Control).....	30

3.2.6 Almacenamiento del producto .....	30
3.3 Análisis fisicoquímicos, de calidad y estadísticos.....	31
3.3.1 Determinación y análisis de las curvas de secado.....	31
3.3.2 Determinación de contenido total de polifenoles.....	31
3.3.3 Determinación de capacidad antioxidante mediante DPPH.....	32
3.3.4 Determinación de color .....	33
3.3.5 Determinación de humedad .....	34
3.3.6. Determinación de actividad de agua .....	34
3.3.7 Determinación de solidos solubles.....	34
3.3.8 Análisis estadístico.....	35
4. Resultados y discusión .....	37
4.1 Caracterización fisicoquímica de la materia prima .....	37
4.2 Tiempos de secado.....	38
4.3 Tiempos de operación del ultrasonido y energía requerida. ....	41
4.4 Cinética de secado .....	41
4.5 Contenido de polifenoles totales (TPC).....	45
4.6 Capacidad antioxidante (AA).....	48
4.7 Color .....	50
5. Conclusiones.....	56
7. Anexos.....	67
7.1 Ajuste de curvas de secado mediante el modelo basado en la segunda ley de Fick ..	67
7.2 Contenido de polifenoles totales .....	68
7.3 Ejemplo de cálculo polifenoles totales (TPC).....	69
7.4 Capacidad antioxidante de las muestras .....	70
7.5 Ejemplo de cálculo para la actividad antioxidante (AA).....	70

## Índice de tablas

Tabla 1. Composición nutricional del tomate fresco. ....	13
Tabla 2. Propiedades de la pulpa de tomate escaldada .....	37
Tabla 3. Tiempos de funcionamiento del ultrasonido para las diferentes condiciones de secado.....	41
Tabla 4. Parámetros obtenidos mediante el modelo anómalo. ....	44
Tabla 5. Parámetros obtenidos mediante el modelo basado en la segunda ley de Fick.....	44

Tabla 6. Parámetros de coordenadas CIEI*a*b* en el producto final a distintas condiciones de secado. ....	53
Tabla 7. Contenido de polifenoles totales (TPC) en las distintas muestras. ....	68
Tabla 8. Actividad antioxidante total (AA) en las distintas muestras.....	70

## Índice de figuras

Figura 1. Disposición esquemática de la ventana refractiva. ....	18
Figura 2. Tomate Larga vida. ....	26
Figura 3. Diagrama general del procedimiento experimental. ....	26
Figura 4. Preparación de la pulpa de tomate. A: Tomate fresco, B: Tomate trozado, C: Escaldado, D: Retiro de agua, E: Pulpa de tomate, F: Pulpa de tomate en molde de goma circular.....	27
Figura 5. Secado de pulpa de tomate en ventana refractiva. ....	28
Figura 6. Esquema de ventana refractiva con ultrasonido. ....	29
Figura 7. Secado de pulpa de tomate en ventana refractiva con ultrasonido. ....	29
Figura 8. Secado de pulpa de tomate en liofilizador.....	30
Figura 9. Curvas de actividad de agua en ventana refractiva a 70, 80 y 90°C.....	38
Figura 10. Curvas de actividad de agua en ventana refractiva acoplada a ultrasonido a 70°C.....	39
Figura 11. Curvas de actividad de agua en ventana refractiva acoplada a ultrasonido a 80°C.....	39
Figura 12. Tiempos de secado para llegar a una $A_w$ de 0.4 en las diferentes condiciones de operación. ....	40
Figura 13. Ajuste de modelo Anómalo para el secado en ventana refractiva a 70, 80 y 90°C.....	42
Figura 14. Ajuste del modelo anómalo para el secado a 70°C en VR y VR+US.....	42
Figura 15. Ajuste del modelo anómalo para el secado a 80°C en VR y VR+US.....	43
Figura 16. Contenido de polifenoles totales en el producto a diferentes condiciones de secado.....	46
Figura 17. Capacidad antioxidante de la materia prima y el producto seco a diferentes condiciones de secado. ....	49
Figura 18. Pulpa de tomate liofilizada (referencia). ....	51
Figura 19. Polvo de tomate obtenido en ventana refractiva a 70, 80 y 90°C, respectivamente. ....	51
Figura 20. Polvo de tomate obtenido a 70°C en VR, VR+US50% y VR+US100%, respectivamente. ....	52
Figura 21. Polvo de tomate obtenido a 80°C en VR, VR+US50% y VR+US100%, respectivamente. ....	52
Figura 22. Diferencias de color del polvo de tomate obtenido en los distintos secados con relación al liofilizado. ....	54

Figura 23. Ajuste del modelo basado en la segunda ley de Fick para el secado en VR a 70, 80 y 90°C.....	67
Figura 24. Ajuste del modelo basado en la segunda ley de Fick para el secado a 70°C en VR y VR+US.....	67
Figura 25. Ajuste del modelo basado en la segunda ley de Fick para el secado a 80°C en VR y VR+US.....	68
Figura 26. Curva de calibración ácido gálico.....	69
Figura 27. Curva de calibración Trolox.....	70

## **I. INTRODUCCIÓN**

## **1. Introducción**

En los últimos años y con la llegada del Covid-19 la industria de alimentos enfrenta múltiples desafíos en relación con la demanda de los consumidores, los cuales cada vez presentan más interés y son conscientes de los efectos que tienen los alimentos en el bienestar humano y en algunas enfermedades crónicas. Según datos de Euromonitor internacional, durante el periodo de 2010 a 2015 una de las categorías que más ha crecido dentro del mercado de Salud y Bienestar de Chile es la de alimentos fortificados y/o funcionales, con un aumento del 15.4%. Sumado a esto, las personas han dejado en manifiesto la preferencia a incluir más verduras e ingredientes naturales y poco procesados dentro de la dieta por sobre el factor monetario (Chile & Adimark, 2017).

Por otro lado, en la lucha por hacerle frente a la pérdida y desperdicio de alimentos, ya sea por la limitada vida útil de estos o por etapas previas del proceso agrícola, se han buscado distintas medidas para minimizar las pérdidas. Dentro de ellas destaca el proceso de secado, que ayuda a preservar y estabilizar los alimentos durante el almacenamiento, específicamente frutas y hortalizas, que son los que tienen un mayor nivel de pérdida al deteriorarse por el alto contenido de agua.

El secado o deshidratación es uno de los métodos más antiguos que se ha utilizado para la conservación de alimentos y corresponde a la operación mediante la cual es eliminada total o parcialmente el agua de una sustancia, disminuyendo la actividad de enzimas y microorganismos, las cuales son las principales responsables del deterioro de alimentos. Esto conlleva una reducción del peso y volumen de los alimentos tratados, sobre todo cuando se obtiene un producto en polvo, reduciendo costos de transporte y almacenamiento (Fito et al., 2020). Sumado a esto, las investigaciones recientes en cuanto a métodos de secado buscan disminuir el consumo energético, reducir los periodos de deshidratación y maximizar la retención de nutrientes (Xu et al., 2022).

Uno de los alimentos de interés es el tomate, el cual ha alcanzado una producción mundial de 160 millones de toneladas al año, superando a alimentos como la papa y arroz. Además, un 25% del total de la producción es procesado para convertirlo en pasta de tomate, la cual sirve como base para la elaboración principalmente de salsas y ketchup. En cuanto a Chile,

el país no se queda atrás puesto que se encuentra en el séptimo lugar del ranking mundial de países exportadores de pasta de tomate, siendo considerado el mayor proveedor de Sudamérica (Valenzuela, 2018).

La importancia del tomate radica en su cantidad de licopeno, que en subproductos puede alcanzar hasta 28 mg por cada 100 g del producto procesado, teniendo una fuerte capacidad antioxidante. En recientes investigaciones ha demostrado ser un gran potencial para la prevención de enfermedades como el cáncer de próstata y cáncer de mama, ya sea en aplicaciones directas o como complemento a otros medicamentos y nutrientes (Song et al., 2021). Además, en un estudio realizado a ratones con una dieta alta en grasas, se pudo evidenciar que, al suministrarles polvo de tomate como alimento durante 24 semanas, disminuyó entre un 65 y 95% el desarrollo del carcinoma hepatocelular, el tipo más frecuente de cáncer de hígado (Xia et al., 2018).

Es por ello que para poder aumentar los niveles de ingesta de compuestos bioactivos en la población, es necesario buscar alternativas de secado que permitan obtener un producto con altas concentraciones de estos, pero que también conserven las propiedades organolépticas.

Dentro de las tecnologías novedosas de secado se encuentra la ventana refractiva, un sistema desarrollado por los propietarios de MDC Technologies, Inc donde se utiliza agua como medio para transferir la energía térmica al alimento de interés, obteniendo un producto deshidratado en pocos minutos a diferencia de métodos convencionales (Singham & Birwal, 2014) y con una alta retención de nutrientes, color, vitaminas y antioxidantes (Mahanti et al., 2021).

Ahora bien, para hacer que el proceso tenga una mayor eficiencia se han introducido al mercado otras técnicas que contribuyen al secado, como lo es el ultrasonido, en donde a diferencia del microondas, la radiación gamma o el campo eléctrico pulsado no se han percibido efectos negativos en las personas, por lo que puede ser aplicado sin problema en la industria de alimentos (Kentish & Ashokkumar, 2011). El ultrasonido corresponde a ondas mecánicas con una frecuencia entre 20 kHz y 1MHz, que al ser aplicadas en un medio son capaces de generar fases de expansión y compresión, teniendo efectos positivos en el tiempo

de secado y en la conservación de color y nutrientes como fenoles, flavonoides y antioxidantes (Huang et al., 2020).

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

- Acoplar ultrasonido con ventana refractiva para evaluar el efecto en el tiempo del proceso de deshidratación de pulpa de tomate y la calidad del producto final, considerando retención de polifenoles, capacidad antioxidante y color.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema de secado basado en ventana refractiva acoplado a ultrasonido.
- Estudiar la cinética de secado para evaluar el efecto del ultrasonido en el valor de la difusividad efectiva.
- Determinar las condiciones de operación de secado que maximicen la retención de polifenoles y capacidad antioxidante del producto final.
- Determinar y evaluar los parámetros de calidad del alimento antes y después del proceso de secado para comparar los efectos de la implementación del ultrasonido.

## **II. MARCO TEÓRICO**

## 2. Marco teórico

### 2.1 Tomate

La materia prima que se va a utilizar en esta investigación será el tomate (*Solanum Lycopersicum L.*), cuyo origen proviene de Los Andes del Perú donde se cree que tenía el tamaño de un arándano (Razifard et al., 2020). Sin embargo, fue en México donde su cultivo se diversificó y expandió, dando origen al fruto que se conoce hoy por su color rojo intenso y forma redonda, convirtiéndose en una pieza fundamental en la dieta de las personas en todo el mundo debido a su versatilidad y variedad, siendo empleado en múltiples preparaciones culinarias como ensaladas, salsas, sopas, etc.

### 2.2 Composición química del tomate y valor nutricional.

El tomate se encuentra compuesto principalmente por agua y dependiendo del grado de madurez, la variedad y modo de cultivo se pueden encontrar algunos fitoquímicos como los carotenoides, conformados principalmente por licopeno, el cual constituye aproximadamente un 80-90% del total de pigmentos (Shi, 2008) y  $\beta$ -caroteno, además se encuentran compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, flavonoides y lectinas), vitaminas (vitamina A, tocoferoles y vitamina C) y minerales (potasio, fósforo, magnesio, calcio, entre otros). En la **Tabla 1**, se pueden apreciar algunos de los principales compuestos que contienen 100 g de tomate fresco.

**Tabla 1.** Composición nutricional del tomate fresco.

Composición del tomate fresco	Por cada 100 g	Composición del tomate fresco	Por cada 100 g
Agua (g)	94	Zinc (mg)	0.22
Calorías (kcal)	22	Yodo ( $\mu$ g)	7
Hidratos de carbono (g)	3.5	Vitamina C (mg)	26
Fibra (g)	1.4	Vitamina E (mg)	1.2
Proteína (g)	1	Vitamina B6 (mg)	0.11
Grasa total (g)	0.11	Equivalentes niacina (mg)	0.8
Potasio (mg)	290	Tiamina (mg)	0.06
Fósforo (mg)	27	Riboflavina (mg)	0.04
Calcio (mg)	11	Vitamina A ( $\mu$ g)	82
Magnesio (mg)	10	Folatos ( $\mu$ g)	28
Hierro (mg)	0.6		

Nota. Adaptado de "Tablas de composición de alimentos" (p. 230), por Moreiras et al., 2013, Ediciones Pirámide, 16 ed.

Se puede observar, que el tomate presenta altas cantidades de potasio y fosforo. El potasio ayuda en la función y transmisión nerviosa, en las contracciones musculares y en el buen funcionamiento del ritmo cardiaco y riñón. Mientras que el fósforo es parte fundamental de nuestro cuerpo, ya que se encarga de la formación de huesos y dientes.

Dentro de las vitaminas, destaca la vitamina A, la cual se encargada de la formación de tejidos blandos y óseos, además de reconstruir las membranas mucosas. En el caso del tomate, la vitamina A se encuentra en forma de provitamina A, es decir, como carotenoide, y debe ser digerida y bioprocesada para obtener su forma activa.

## **2.3 Compuestos bioactivos del tomate**

### **2.3.1 Carotenoides**

El licopeno es el compuesto bioactivo más abundante que se encuentra presente en el tomate y corresponde a un pigmento vegetal liposoluble del grupo de los carotenoides que se encarga de aportar el color rojo característico al tomate y también a otros alimentos como la sandía, el pimentón, las uvas, el pomelo, etc. Este compuesto es de interés, ya que, “posee efectos antioxidantes, antiinflamatorios y quimioterapéuticos sobre enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y algunos tipos de cáncer” (Cruz et al., 2013, p. 6).

Sin embargo, su consumo a través de la dieta es insuficiente, ya que, al encontrarse ligado a la matriz y estar en su forma trans se impide su liberación completa, lo que dificulta su absorción en el aparato digestivo humano. Por otra parte, el contenido de licopeno se encuentra condicionado por el genotipo, condiciones de crecimiento y grado de madurez del fruto, por lo que existe una alta variabilidad de la concentración de este compuesto.

Entonces, para lograr un mejor aprovechamiento del licopeno se recomienda que el tomate se consuma en su forma procesada, es decir, mediante salsas, jugos, conservas y tomates deshidratados, puesto que al someterlo a temperaturas y romper su estructura mejora su biodisponibilidad y absorción en el organismo. De igual modo, dentro del tomate también se encuentran otros carotenoides como el fitoeno, fitoflueno, b-caroteno y luteína.

La destrucción de estos compuestos reduce el valor nutritivo de los alimentos y produce la decoloración y pérdida en sus características organolépticas. Esto depende principalmente de la presencia de agentes oxidantes en el medio (sobre todo oxígeno molecular), exposición a la luz y/o calor, por lo que es de vital importancia exponer al alimento lo menos posible a estas condiciones para evitar las reacciones de degradación (Meléndez et al., 2004).

### **2.3.2 Compuestos fenólicos**

Los polifenoles o compuestos fenólicos (CF) son metabolitos secundarios de las plantas que derivan de la ruta de los fenilpropanoides y son sintetizados por la vía de shikimato (Vázquez et al., 2016). Existen miles de CF distribuidos en el reino vegetal y su concentración puede variar dependiendo de la variedad de la planta y la maduración del fruto (Anton et al., 2017).

En tomates los polifenoles se encuentran principalmente en la piel (Tylewicz et al., 2018) y están en menor concentración que los carotenoides, pero aun así son relevantes, ya que presentan una gran cantidad de efectos benéficos para los seres vivos, dentro de los cuales se encuentra la síntesis proteica, actividad enzimática, defensa ante agresiones de patógenos e insectos, propiedades antiinflamatorias y su gran capacidad antioxidante, esencial para combatir enfermedades producidas por el estrés oxidativo de las células (Valencia et al., 2017).

En función de su estructura principal, los polifenoles se pueden dividir en diferentes familias. Dentro de los principales compuestos fenólicos del tomate se pueden encontrar ácidos hidroxicinámicos, flavonoles, flavanonas y antocianinas. Siendo el principal de estos la naringenin chalcona, con concentraciones que pueden llegar a los 18.2 mg/100 g. Por otro lado, la quercetina es el compuesto más importante de la familia de los flavonoles con concentraciones que varían desde 0.7 a 4.4 mg/100 g en función de la variedad. El ácido clorogénico es el principal polifenol de la familia de los ácidos hidroxicinámicos y su contenido oscila entre 1.4 y 3.3 mg/100 g. Y en menor concentración se encuentra la naringenina y otros flavonoles como el kaempferol y myricetina (Martí Renau, 2018).

### **2.3.3 Compuestos antioxidantes**

Los antioxidantes son compuestos capaces de inhibir o retardar la oxidación mediante la captación de radicales libres (Luna & Delgado, 2014), generalmente proveniente de lípidos, proteínas o ácidos nucleicos; reduciendo así su capacidad de dañar las células.

En nuestro organismo se producen antioxidantes endógenos enzimáticos y no enzimáticos, que cumplen un rol fundamental en la prevención de procesos fisiológicos y enfermedades. Pero estos compuestos también pueden ser incorporados a través de la dieta o por suplementos nutricionales (Martínez, 2019).

Originalmente la actividad antioxidante del tomate se asoció principalmente con su contenido de licopeno. No obstante, este también se compone de una rica fuente de vitamina A, C y E, además de flavonoides y compuestos fenólicos totales, los cuales contribuyen en la capacidad antioxidante y, por ende, tienen efecto en la prevención de enfermedades carcinogénicas y cardiovasculares. (Palomo et al., 2010)

### **2.4 Mercado nacional del tomate**

En Chile el tomate es una de las principales hortalizas cultivadas en términos de superficie y producción, puesto que es empleado para el consumo fresco y para la industria. Además, se encuentra disponible a lo largo de todo el año debido a sus diferentes ciclos productivos según la época de siembra, dado que en invierno el tomate proviene principalmente de la zona norte del país, mientras que en los meses de verano se produce en las regiones de O'Higgins y Valparaíso (Flaño, 2013).

En el 2020 el país realizó un total de 461 millones de dólares en exportaciones de hortalizas, siendo la principal la pasta de tomate con un 35% del valor exportado, lo que refleja la alta rentabilidad comercial del tomate a nivel nacional (Muñoz, 2021).

Sin embargo, la creciente industrialización de estos productos ha generado una gran cantidad de subproductos como cáscaras, semillas y orujos que son consideradas residuos. No obstante, la mayor parte de compuestos bioactivos se encuentran en la piel y semillas de las

frutas (Coman et al., 2020), por lo que una manera de aprovechar los compuestos fitoquímicos que se encuentran presentes es a través del secado de estos subproductos.

Así, el producto que se obtiene al realizar el secado de pulpa de tomate corresponde a polvo de tomate, siendo un gran aliado para la cocina, no solo por el sabor y aroma que puede aportar en las comidas, sino también por las propiedades que se le atribuyen nutricionalmente. Esto gracias a la gran cantidad de macro y micro minerales que posee, como calcio, potasio, fósforo y magnesio (Srivstava & Kulshrestha, 2013).

La ventaja del polvo de tomate es que este puede ser usado directamente como aliño en distintas preparaciones, pero también se puede emplear como aditivo natural en productos alimenticios de bajo valor nutricional. Un ejemplo de ellos es el pan, en donde la fortificación con tomate deshidratado aumentó los niveles de fibra y zinc (Rodríguez et al., 2013). Mientras que en diferentes productos cárnicos se logró disminuir la oxidación lipídica, aumentar la estabilidad, extender la vida útil y mejorar la calidad nutricional (Domínguez et al., 2020).

## **2.5 Tecnologías de secado**

Hoy en día existen diversos métodos de secado, pero los más utilizados en la industria utilizan aire caliente por convección como medio de transferencia de calor, dañando la estructura de los alimentos y exponiéndolos largos tiempos a condiciones extremas.

Actualmente se ha investigado la deshidratación o secado para diversos tipos de alimentos, incluyendo el tomate o subproductos de este para optimizar procesos y mejorar las condiciones del producto final, tanto nutricionalmente como organolépticamente (textura, color y sabor).

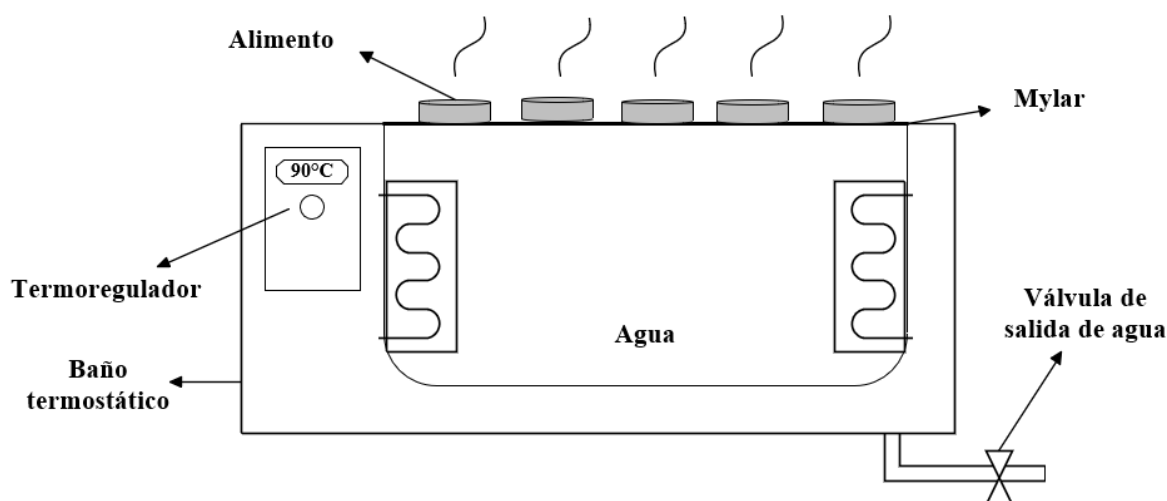
El 2021, Sonawane y otros investigadores realizaron una comparación de secado con aire caliente, al vacío y de microondas con vacío para la deshidratación de sopa de tomate. La cinética obedeció a una reacción de primer orden, viéndose afectada principalmente por la humedad relativa, velocidad del aire, temperatura del aire, tamaño y composición del alimento. Los resultados concluyeron que el secado al vacío con microondas a 45°C por 1 hora presentó una pérdida del 16% del contenido de licopeno, mientras que en el secado al vacío y el secado con aire caliente las pérdidas fueron del 19% y 26%, respectivamente.

En otro estudio, se realizó el proceso de secado con aire caliente a tomates en trozos utilizando temperaturas en un rango de 60°C a 100°C, donde también se observó una cinética de primer orden con  $R_2$  mayor a 0.887 e influencia significativa de la temperatura en la pérdida de algunos compuestos bioactivos. Esto principalmente debido a reacciones de isomeración y oxidación que provocaron la degradación de dichos compuestos. Además, al tener un producto que se encuentra en trozos, se obtuvo una mayor sensibilidad al daño oxidativo por la exposición de la superficie del tomate al ambiente (Demiray et al., 2013).

### 2.5.1 Ventana refractiva

Se utilizará la ventana refractiva o el secado hidro conductivo (ver **Figura 1**), el cual es un método relativamente nuevo, que consiste en un baño de agua termorregulado; usualmente a 95°C. Sobre el agua, se pone una fina película transparente de poliéster (Mylar) y encima de esta se distribuye el alimento, por lo que gran parte de la energía térmica se transfiere por conducción, ya que a través de la lámina caliente se transfiere directamente el calor al alimento, logrando fácilmente la evaporación del agua. No obstante, en este equipo también se encuentran presentes los efectos de la convección y radiación.

Debido al contacto que tiene el alimento con la superficie a alta temperatura, existe un tiempo de secado más corto en comparación a métodos convencionales que en su mayoría son por convección.



**Figura 1.** Disposición esquemática de la ventana refractiva.

### **2.5.2 Secado asistido por ultrasonido**

El ultrasonido corresponde a ondas mecánicas de sonido con una frecuencia mayor a 20 kHz, por lo que no pueden ser captadas por el oído humano. El uso de ondas ultrasónicas ha sido de gran utilidad para la mejora de algunos procesos industriales, pues los fenómenos físicos y químicos que se generan son diferentes a las técnicas convencionales de extracción, procesamiento y conservación (Robles & Ochoa, 2012).

En función de la frecuencia el ultrasonido se clasifica en 2 grupos. Por un lado, se tiene el ultrasonido de baja intensidad (UBI) con frecuencia sobre 100 kHz el cual es utilizado para el análisis de alimentos en su procesamiento y almacenamiento, ya que estudia las propiedades fisicoquímicas y estructurales. Y, por otro lado, se tiene el ultrasonido de alta intensidad (UAI), con frecuencia entre 20 a 100 kHz, capaz de generar efectos o modificaciones en la estructura de los alimentos, por lo que ha sido usado en procesos de secado, en congelación y en extracción de compuestos (Castillo, 2016).

La propagación de las ondas ultrasónicas a una frecuencia determinada genera la formación, crecimiento y colapso de burbujas de vapor o gas en un medio, lo cual se conoce como cavitación (Ramón & Gil, 2021).

Ahora bien, para poder aplicar el ultrasonido al alimento de interés, existen 3 maneras: De forma directa, acoplada a un dispositivo o sumergido en un baño ultrasónico (Chemat et al., 2011). En aplicaciones líquidas, los sistemas más utilizados son los baños y los sistemas tipo sonda. En los baños ultrasónicos los transductores se fijan al fondo de un tanque metálico que transmite la vibración al líquido contenido y en los sistemas de sonda, dependiendo de su geometría el ultrasonido se aplica directamente al introducir al medio una parte vibratoria del dispositivo para transmitir la energía. También se puede concentrar esta energía en una superficie para amplificar la intensidad y sus efectos.

El modo de emisión puede ser continuo (vibración constante) o intermitente (interrupción de la vibración). Las ondas continuas producen efectos térmicos aportando mayor potencia. Sin

embargo, una aplicación intermitente aumenta la energía y el poder de penetración de las ondas en el medio.

La tecnología de ultrasonido en los procesos de deshidratación, específicamente en el secado por convección ha sido estudiada en los últimos años, debido a sus efectos positivos en la reducción de tiempos de secado y mejoras en la retención de color y nutrientes, principalmente cuando se opera a bajas temperaturas.

Se realizó un estudio del secado con aire caliente asistido con ultrasonido a 21 kHz en manzanas Granny Smith, donde se observó claramente que a temperaturas de 30 y 50°C el ultrasonido redujo hasta un 54% el tiempo de secado. No obstante, cuando la temperatura era de 70°C el tiempo del proceso se redujo en un 17%. En relación con esto se evidenció un aumento significativo en el coeficiente de difusión a medida que aumentaba la temperatura de secado y la intensidad del ultrasonido (Rodríguez et al., 2014).

De igual manera, Schössler y otros autores (2012) probaron el secado por convección asistido por ultrasonido para muestras de pimiento rojo y manzana a 70°C. El ultrasonido fue aplicado tanto de forma continua como intermitente; 10 segundos de sonicación seguidos de fases de 10 y 90 segundos de recuperación. Al analizar las curvas de secado se evidenció que las muestras sometidas a sonicación continua y las muestras secadas de forma intermitente con 10 s de recuperación presentan curvas casi idénticas. Sin embargo, si se presentan efectos significativos entre la segunda y quinta hora de secado cuando las muestras se someten a un mayor tiempo de recuperación (90 s), lo cual se asimila más al tratamiento con aire caliente por sí solo, por lo que no existe mucha influencia en la velocidad de secado al optar por esa condición de operación. En cuanto a los resultados de tiempos de secado, la aplicación de ultrasonido continuo durante el secado por convección de pimiento rojo a 70°C resultó en un ahorro de tiempo del 23 % para alcanzar una humedad del 20%. En el caso de los cubos de manzana, el efecto del ultrasonido es aún mayor, puesto que para alcanzar la misma humedad el tiempo se reduce en un 27%. Por otra parte, en el tratamiento con ultrasonido intermitente (con recuperación de 10 seg) para la manzana se obtuvieron ahorros de tiempo de secado del 18 %.

Se desarrolló una técnica de secado que utiliza una combinación de ultrasonido (40 kHz, 200 W) y deshidratación al vacío para acortar el tiempo de secado y mejorar la calidad de las rodajas de zanahoria. Se comparó el efecto de la velocidad de secado en el tratamiento con vacío y el secado al vacío ultrasónico a 65 y 75°C, obteniendo que al aplicar ultrasonido (10 on y 5 off) hubo una disminución del 41% y 53% en el tiempo de secado, respectivamente. Por otro lado, además de los resultados en la disminución en el costo energético, la capacidad de rehidratación, valor nutricional, color y textura de las rodajas de zanahoria secadas por vacío con ultrasonido son notablemente mejores en comparación con las rodajas de zanahoria secadas al vacío. (Chen et al., 2016)

De hecho, Baeghbali y otros autores (2019) combinaron el efecto de ultrasonido e infrarrojo en un secador de ventana refractiva para el secado de láminas de manzana. En donde se logró obtener mayores velocidades de secado, mínima disminución de color en las muestras e incluso lograron aumentar la reducción de humedad del alimento. Por otra parte, se obtuvo una diferencia insignificante al comparar esta configuración con la liofilización en cuanto a parámetros de calidad como vitaminas (A y C), fenoles totales y flavonoides. Convirtiéndose en una opción de interés, más accesible y rentable para producir productos deshidratados de alta calidad.

En pretratamientos de secado, se sumergieron láminas de manzanas durante 5 min a 25°C en ciertos fluidos y con la asistencia de ultrasonido (sonda de 14 mm y 49 J/s), se obtuvieron menores tiempos de secado, mayores aumentos en la difusividad y cambios en la estructura celular en comparación con las muestras que no fueron asistidas por ultrasonido (Llabrés, 2013).

## **2.6 Modelación matemática del mecanismo de difusión para el análisis de la cinética de secado**

La cinética de secado es proporcional al cambio del contenido de humedad de un alimento a través del tiempo. Esta evolución es medida a través de la variación que experimenta el peso

de una muestra durante un tiempo determinado, de manera que se puede conocer cuánta agua tiene la muestra en cualquier instante del proceso. Por consiguiente, con una adecuada modelación de los datos es posible estimar y optimizar el tiempo de proceso y las condiciones de operación necesarias, como el espesor de la muestra y temperatura de secado; para lograr un producto con la humedad deseada (Velásquez, 2007).

En la deshidratación de un alimento los mecanismos de transferencia de agua son causados debido a fuerzas capilares, gradientes de concentración o presión, fenómenos superficiales, y vaporización-condensación del vapor de agua (Ibarz, 2005).

El mecanismo de difusión inicialmente comienza con la masa de agua que es transferida desde la superficie del alimento hacia el exterior, y después desde las zonas internas hasta alcanzar la superficie.

Para saber con qué facilidad sale el agua del alimento, se evalúa la difusividad efectiva. Esta indica la tasa de movimiento de la humedad del alimento durante el secado, por lo tanto, si el coeficiente de difusividad es mayor esto implica un tiempo de secado más corto.

### **2.6.1. Modelo basado en la segunda Ley de Fick**

Para determinar la difusión efectiva ( $D_{eff}$ ) del agua que se pierde en el proceso de secado se aplica el modelo fenomenológico basado en la segunda ley de Fick.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$$

Donde  $W$  corresponde a la concentración de agua en el alimento (kg agua/ kg solidos secos),  $D_{eff}$  es la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ),  $x$  es la ruta de difusión (m) y  $t$  es el tiempo (s).

Para desarrollar el modelo se considera que el mecanismo de transferencia de masa es de carácter difusional y que su coeficiente de difusión es constante y no depende del contenido de agua del alimento. Además, supone que la resistencia externa a la transferencia de masa es insignificante en comparación con la resistencia interna, que el agua presente en el alimento se encuentra distribuida homogéneamente, que la muestra de alimento es una placa infinita y que no existe encogimiento de este durante el proceso de secado, teniendo la siguiente relación.

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} e^{\left(\frac{-(2i-1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4L^2}\right)}$$

Donde  $MR_t$  representa la tasa de humedad adimensional de la muestra en el instante  $t$ ,  $L$  es el espesor de la muestra y  $t$  es el tiempo de secado.

En el caso de que se realice el análisis por tiempos prolongados, es decir, cuando  $MR < 0.6$ , solo el primer término de la serie toma relevancia, por lo que la expresión es simplificada como se muestra a continuación:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t}{4L^2}\right)}$$

Por otra parte, la dependencia a la temperatura del coeficiente de difusión efectiva se indica mediante la ecuación de Arrhenius, siendo:

$$D_{eff} = D_{ref} e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)}$$

Donde  $D_{ref}$  es un factor preexponencial de la ecuación de Arrhenius ( $m^2/s$ ),  $E_a$  es la energía de activación para la difusión de humedad (kJ/mol),  $R$  es la constante universal de los gases (kJ/molK) y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

### 2.6.2. Modelo anómalo basado en cálculo fraccional

En los procesos de secado de alimentos generalmente no se cumple Fick, pues si bien la expresión obtenida puede ajustarse de buena forma a los cambios de humedad de los datos experimentales, no representa directamente las propiedades de los materiales ni los parámetros fenomenológicos. De ahí nace la idea de utilizar la formulación fraccionada para representar la evolución del transporte de masa en la difusión de medios porosos (Simpson et al., 2013).

$$\frac{\partial^\alpha W}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$$

Asumiendo que la concentración inicial es homogénea y considerando la simetría y la concentración superficial como condiciones de contorno, se obtiene la solución para la ecuación, la cual se muestra a continuación:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} E_{\alpha} \left( \frac{-(2i-1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t^{\alpha}}{4L^2} \right)$$

$E_{\alpha}$  corresponde a la función de Mittag-Leffler. La cual es importante en la resolución de derivadas de orden fraccionario y tiene la forma que se presenta a continuación:

$$E_{\alpha}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{\Gamma(1 + \alpha k)}$$

Para  $\alpha = 1$ , la ecuación de Mittag-Leffler tiende a la exponencial. Al igual que con Fick, para tiempos largos y orden fraccionario cercano a 1 es posible aproximar la serie de la ecuación considerando solo un término, resultando:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left( \frac{-D_{eff} \cdot \pi^2 \cdot t^{\alpha}}{4L^2} \right)}$$

El orden fraccional  $\alpha > 1$  indica que la naturaleza del proceso de difusión anómala es superdifusiva. Un  $\alpha < 1$  significa que las moléculas de agua tardan más tiempo en ser extraídas del alimento y, por ende, el proceso es subdifusivo. Finalmente, si  $\alpha = 1$ , el proceso sigue un comportamiento fickiano.

### **III. METODOLOGÍA**

### 3. Metodología

#### 3.1 Materia prima

La materia prima utilizada para el proceso corresponde a tomates maduros *Larga Vida*, los cuales fueron obtenidos del supermercado Jumbo 2 días antes de cada experimento para estandarizar en la medida de lo posible el proceso. Luego, se sometieron a un proceso de lavado para eliminar residuos y cuerpos extraños adheridos a la fruta y se almacenaron a 5°C hasta su posterior uso.



Figura 2. Tomate Larga vida.

#### 3.2 Procedimiento experimental

A continuación, se detalla de manera general las etapas del procedimiento. Donde primero se prepara la materia prima mediante un escaldado y trituración del tomate para la obtención de la pulpa, luego se realiza la caracterización de esta y posteriormente, se somete al alimento a las distintas condiciones de secado. Finalmente, se realiza el análisis de los parámetros de calidad en el producto final.

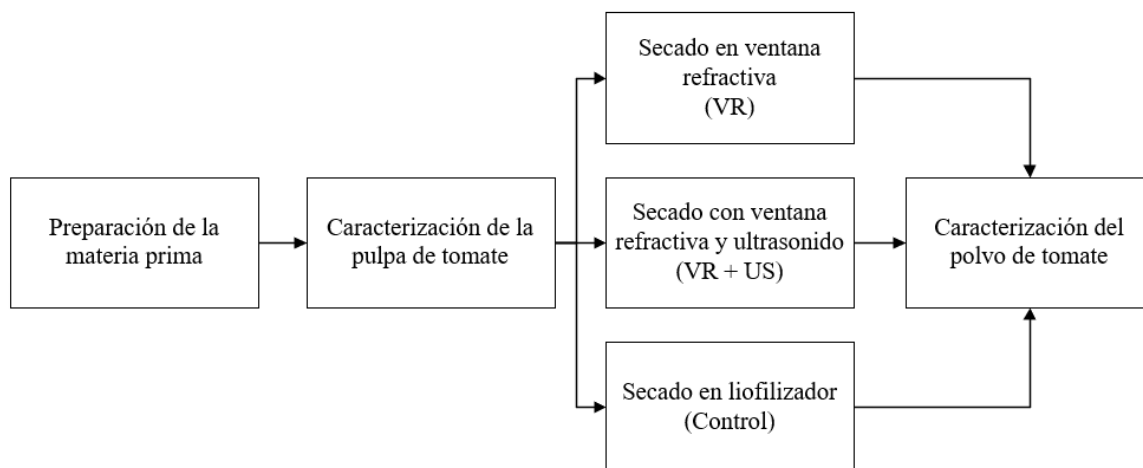
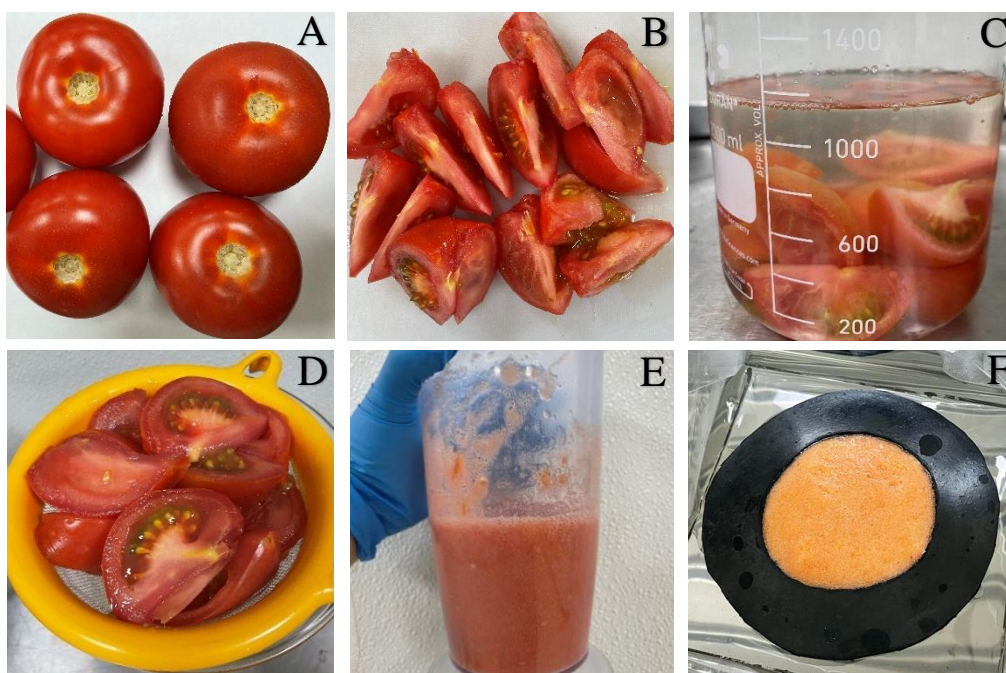


Figura 3. Diagrama general del procedimiento experimental.

### 3.2.1 Preparación de la materia prima

Para la preparación de la materia prima, se trozó el tomate en 8 partes y luego se realizó el escaldado, sumergiendo los trozos de tomate en agua a 96°C por 15 segundos (Aguilar et al., 2015). Una vez pasado el tiempo, los tomates se dejaron en agua fría (a 4°C) por 1 minuto y luego, se les retiró el exceso de agua mediante un colador. Posteriormente, se trituró el tomate con una minipimer (Black & Decker SB400-CL, China) hasta obtener una mezcla homogénea como se aprecia en la **Figura 4E**. Las muestras fueron dispuestas en estado líquido para los tres métodos de secado propuestos.



**Figura 4.** Preparación de la pulpa de tomate. A: Tomate fresco, B: Tomate trozado, C: Escaldado, D: Retiro de agua, E: Pulpa de tomate, F: Pulpa de tomate en molde de goma circular.

### 3.2.2 Caracterización de la pulpa de tomate

Se realiza la caracterización de la pulpa de tomate en cada experimento mediante los análisis fisicoquímicos (humedad, actividad de agua, color, sólidos solubles) y los análisis de calidad (polifenoles totales y capacidad antioxidante). Con esto se establecen las condiciones iniciales de referencia para la comparación con el producto final obtenido.

### 3.2.3 Secador de ventana refractiva (VR)

Para el secado con ventana refractiva se utilizó un equipo piloto operado por lotes (Memmert WNB-45, Alemania) que consiste en un baño termostático con capacidad para 60 L de

agua. Sobre el agua se dispuso de una fina película de plástico (Mylar) para permitir la transferencia de energía, dejando espacio entre las paredes del baño termostático para purgar las burbujas de aire producidas por el calentamiento del agua. Además, en la superficie del Mylar se distribuyeron moldes circulares de goma para disponer las muestras y asegurar en cada secado un espesor de 3 mm y un diámetro de 6 cm, como se puede ver en la **Figura 5**.



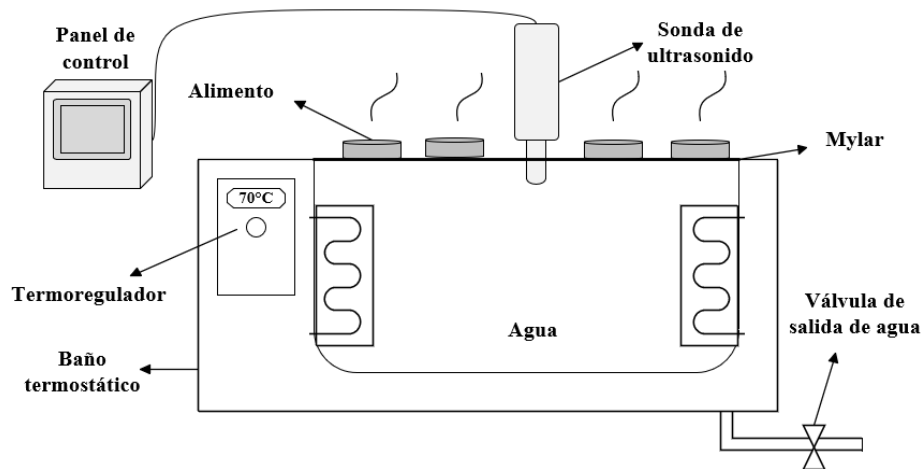
**Figura 5.** Secado de pulpa de tomate en ventana refractiva.

El proceso se llevó a cabo a tres temperaturas diferentes (70, 80 y 90°C). Además, para la obtención de las curvas de secado y facilitar la toma de muestras, la pulpa de tomate fue distribuida homogéneamente sobre bloques de mylar de 11 x 11 cm, con moldes de goma circulares de las mismas dimensiones descritas anteriormente. Esto con el fin de poder monitorear el peso de la muestra a lo largo del proceso.

El rango de temperaturas fue seleccionado en base a los antecedentes de la investigación, priorizando el tiempo de secado y la retención de nutrientes. Por otro lado, el espesor de la pulpa fue seleccionado a partir de los resultados fisicoquímicos que se obtuvieron en la deshidratación de pulpa de mango (Ledesma, 2018) y la baja pérdida de carotenos en el secado de pulpa de guayaba (Leiton, 2016).

#### **3.2.4 Secador de ventana refractiva con ultrasonido**

Para el acoplamiento del ultrasonido a la ventana refractiva se utilizó el mismo equipo descrito anteriormente (Memmert WNB-45, Alemania), salvo que, en la parte central de la ventana, se realizó un orificio para poder sumergir la sonda de ultrasonido (Qsonica CL-334, EE.UU) como se muestra en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Esquema de ventana refractiva con ultrasonido.

En el proceso se emplearon las mismas condiciones de operación que en el secado en ventana refractiva por sí solo, es decir un espesor de 3 mm y diámetro de 6 cm (ver **Figura 7**). Pero se trabajó solamente con temperaturas de 70 y 80°C, debido a la restricción máxima de temperatura que permite la sonda. Además, al acoplar la sonda de ultrasonido (Qsonica CL-334, EE.UU) se trabajó con una frecuencia fija de 20 kHz y se optó por trabajar de forma pulsada (On/Off); con sonicación de 30 s y tiempos de descanso de 10 s. Para los distintos secados se evaluó el efecto de la intensidad del ultrasonido, la cual fue modificada mediante la amplitud del equipo, considerando 50 y 100%.



**Figura 7.** Secado de pulpa de tomate en ventana refractiva con ultrasonido.

### 3.2.5 Liofilizador (Control)

Se realiza el secado mediante liofilizador como método de control, debido a que se obtiene un producto con mayor retención de los compuestos bioactivos en comparación con otras tecnologías de secado. Para esto, la pulpa de tomate se dispuso en bolsas plásticas y fue almacenada en una congeladora (Haier ULT Frezzer DW-86W100J, China) a  $-80^{\circ}\text{C}$  durante un tiempo de 24 horas (Tan et al., 2021). Luego, como se observa en la **Figura 8**, las muestras congeladas se ponen sobre placas Petri y se envuelven en muselina para evitar salpicaduras dentro de la cámara de vacío del liofilizador (Christ Alpha 2-4 LCSplus, Alemania).

Las condiciones de operación consideran: una temperatura de secado de  $25^{\circ}\text{C}$ , temperatura del condensador de  $-50^{\circ}\text{C}$  y presión de la cámara de vacío de 0.1 mbar durante 48 horas (Duchitanga, 2018).



**Figura 8.** Secado de pulpa de tomate en liofilizador.

### 3.2.6 Almacenamiento del producto

Una vez que el alimento es sometido al proceso de secado, el producto se almacena en envases plásticos sellados herméticamente con Parafilm; para mantener el alimento libre de la humedad del ambiente. Además, cada envase fue envuelto en papel aluminio y guardado en bolsas herméticas para evitar la oxidación y deterioro de los compuestos. Las bolsas fueron almacenadas en el congelador a  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta su posterior análisis.

### **3.3 Análisis fisicoquímicos, de calidad y estadísticos.**

A continuación, se mencionan los análisis fisicoquímicos y de calidad que se llevaron a cabo y los respectivos equipos utilizados para este fin. Estos análisis fueron realizados para caracterizar la materia prima antes y después de ser procesados según los tratamientos de secados propuestos en la sección 3.2. *Procedimiento experimental*. Los análisis planteados se realizan por triplicado para cada condición de secado.

#### **3.3.1 Determinación y análisis de las curvas de secado**

A partir de los datos de humedad inicial y variación de peso en función del tiempo de proceso, se obtendrán las curvas de secado y la velocidad de secado.

Los resultados presentados para el cambio de humedad de las muestras en el tiempo se realizarán bajo la adimensionalización de la humedad según la ecuación:

$$MR = \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e}$$

Donde MR es la humedad adimensionalizada,  $H_t$  es la humedad en el tiempo t,  $H_0$  es la humedad inicial y  $H_e$  la humedad de las muestras en condición de equilibrio. Todas las humedades se expresan en porcentaje.

Se modelará la transferencia de agua mediante el modelo basado en la segunda ley de Fick y el modelo anómalo, donde se analiza la influencia de las variables de proceso como la amplitud del ultrasonido y la temperatura. Esto con el fin de evaluar el comportamiento del proceso a diferentes condiciones y conocer cuál de los métodos logra un menor tiempo de secado. Este análisis se llevó a cabo en MATLAB R2022A, en donde se obtuvieron los valores de los coeficientes de difusión efectiva y los  $\alpha$  en el caso del modelo anómalo. Para determinar el mejor ajuste de curva se obtuvo el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) como criterio para cada caso de estudio.

#### **3.3.2 Determinación de contenido total de polifenoles**

Para cuantificar el contenido total de polifenoles se utilizó el método de Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965) con algunas modificaciones, donde la absorbancia se midió a 765

nm en un espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, EE.UU) y los resultados se expresaron como mg GAE (equivalente de ácido gálico) por 100 g<sup>-1</sup> BS.

La curva de calibración se construyó utilizando ácido gálico a una concentración de 100 µg. Primero se preparó una solución de ácido gálico de 1 g/L, es decir, se utilizaron 0.05 g de ácido gálico y se aforó a 50 ml con metanol 80% (v/v). Luego, se diluyó de 0.2 a 1.2 ml de esta solución en matraces aforados de 10 ml con metanol 80% (v/v) para los distintos puntos de la curva.

Posteriormente, se preparó una solución de carbonato de sodio al 10% (p/v) y una solución de Folin-Ciocalteu al 50% (v/v), la cual se diluye con agua destilada. En cada tubo de ensayo se colocó 3.75 ml de agua destilada, 0.5 ml de la solución de carbonato de sodio, 0.5 ml de la solución diluida de ácido gálico y 0.25 ml de solución de Folin-Ciocalteu. Las muestras son agitadas en un vórtex por 1 min aproximadamente y luego son almacenadas en un lugar oscuro por 1 hora. Finalmente, se vierte cada muestra en las celdas de espectrofotometría y se mide la absorbancia a 765 nm.

En cuanto a la extracción de polifenoles, se prepara un extracto metanólico 1:10 entre la muestra y el metanol 80% (v/v). Para esto, se agregan 2 g de muestra en 20 ml de metanol 80% (v/v), se homogeniza en un vórtex y se cubre con papel aluminio durante 1 hora. Luego, se toma una alícuota del extracto y se diluye en relación 1:10. Posteriormente, se toma una alícuota de 0.5 ml del extracto diluido y se agregan 3.75 ml de agua destilada, 0.25 ml de solución Folin-Ciocalteu y 0.5 ml de solución de carbonato de sodio. Cada tubo de ensayo se agita durante 30 segundos y se deja reaccionar por 1 hora a temperatura ambiente y en ausencia de luz. Finalmente, se realiza la medición de la absorbancia en el espectrofotómetro.

### **3.3.3 Determinación de capacidad antioxidante mediante DPPH**

La actividad antioxidante se determina de forma similar a la medición de polifenoles, pero esta se realiza mediante el método DPPH, utilizando un espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, EE.UU) a una longitud de onda de 517 nm. La curva de calibración se prepara con Trolox (97% Thermo Scientific) en concentración 1 mM y se diluye de 0.5 a 4 ml en distintos matraces con metanol 80% (v/v). Luego, se prepara la solución DPPH 0.1 mM y se rectifica que la absorbancia se encuentre dentro del rango de 1.025 a 1.045, para poder ser

utilizado. Posteriormente, se añade en los tubos de ensayo 0.5 ml del matraz con la solución diluida de Trolox y 2.5 ml del reactivo DPPH, se deja reaccionar por media hora en la oscuridad y luego, se mide la absorbancia.

Para medir la actividad antioxidantes del producto seco, se prepara un extracto metanólico de las muestras en relación 1:10 donde se agregan 2 g de muestra en 20 ml de metanol 80% (v/v), se homogeniza y se deja reposar por 1 hora en ausencia de luz. Posteriormente, se diluye 0.1 ml de la extracción metanólica en un matraz aforado de 10 ml con metanol 80% (v/v). Al igual que para la curva de calibración, en cada experimento se añaden 0.5 ml de la solución diluida del matraz y 2.5 ml de la solución de DPPH. Se debe homogenizar cada tubo de ensayo en un vórtex y almacenar en oscuridad por 30 min. Finalmente, se mide la absorbancia con el espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, EE.UU) a 517 nm para obtener la concentración en mg TE (equivalente de Trolox) por g<sup>-1</sup> BS.

### 3.3.4 Determinación de color

Para la medición de color se utilizó un colorímetro (Konica Minolta CR-410, Japón). Este instrumento entrega los parámetros de luminosidad (L\*), espectro de color rojo (+a\*) a verde (-a\*) y espectro de color amarillo (+b\*) a azul (-b\*) correspondientes a las coordenadas cromáticas del espacio CIEL\*a\*b\*.

Antes de cada medición el instrumento fue calibrado con un patrón de color blanco (plato cerámico blanco) con los siguientes parámetros: Y=93.65, x=0.3135, y=0.3196.

Se realizó una medición directa del lector del instrumento, tanto para la muestras frescas como las muestras deshidratadas, y se cuantificó el cambio de color del producto obtenido mediante la siguiente ecuación (Calvo & Durán, 1997):

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2}$$

Donde  $\Delta E$  es la diferencia total de color,  $L_0^*, a_0^*, b_0^*$  son los parámetros de la muestra de referencia y  $L_i^*, a_i^*, b_i^*$  los parámetros del producto final.

Para determinar diferencias significativas de color en las muestras se utilizará el criterio descrito en la norma ISO 12647-2 la cual define los rangos de aceptabilidad para colores de

impresión según la resolución del ojo humano a cambios en el color. Según lo anterior se considerará que una muestra presenta diferencias significativas de color para valores de  $\Delta E$  mayores a 5 unidades (Chen et al, 2008).

### **3.3.5 Determinación de humedad**

La determinación del contenido de humedad se realizó en base al método estipulado en la Association of Official Analytical Chemists (AOAC), metodología 934.06. Esto consiste en pesar en una balanza analítica (Multifuncional electronic JD400-3, China) 5 g de muestra e introducirla en placas Petri al desecador, a una presión menor a 100 mmHg, la cual será suministrada por una bomba de vacío (DOSIVAC Dvr II DVP 1ª, Argentina). Luego de haber cerrado el desecador, este se deja en una estufa (Mettler HCP-108/UFB-400, Alemania) a una temperatura de 60°C por un tiempo de 24 horas o hasta que el peso de la muestra sea constante. Cuando se logre la condición mencionada, las placas se dejan enfriar y posteriormente, se registra el peso seco de la muestra en la balanza analítica.

El contenido de humedad presente en las muestras se mide mediante la siguiente ecuación:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

Donde H representa la humedad de la muestra en porcentaje,  $m_1$  es el peso de la muestra antes de entrar a la estufa y  $m_2$  es el peso seco de la muestra en gramos.

### **3.3.6. Determinación de actividad de agua**

La actividad de agua ( $a_w$ ) se midió para la muestra inicial y el producto final mediante un higrómetro digital de punto de rocío (AquaLab Series 4TE, EE.UU). Este equipo presenta un rango de medición desde 0.05 a 1.000, tiene una resolución de  $\pm 0.001$  y una precisión de  $\pm 0.003$ . Para la elaboración de las curvas de actividad de agua, esta se midió cada 5 minutos a lo largo de todo el proceso en las diferentes condiciones de secado.

### **3.3.7 Determinación de sólidos solubles**

La medición de los sólidos solubles presentes en la muestra fresca se realizó mediante un refractómetro (Hanna Instruments HI-96801, EEUU) de 0.1°Brix de resolución. Se añadieron aproximadamente 3 gotas de la pulpa de tomate en el instrumento de forma directa y el resultado se expresó en °Brix.

### **3.3.8 Análisis estadístico**

Los resultados obtenidos a través de los datos experimentales de cada una de las variables de calidad se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA). Además, se realizan pruebas de rango múltiples de Duncan con un nivel de significancia del 95% utilizando el software STATGRAPHIC Centurion XVI, donde los factores evaluados corresponden a la temperatura del agua del baño termorregulado (70, 80 y 90°C) y la amplitud de la sonda de ultrasonido (50 y 100%).

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Caracterización fisicoquímica de la materia prima

En la **Tabla 2**, se presentan los resultados obtenidos para la caracterización de la pulpa de tomate escaldada, las cuales serán la referencia para ser comparadas con el producto final deshidratado.

**Tabla 2.** Propiedades de la pulpa de tomate escaldada

Características		Valor	IC (95%)
Humedad %		94.68 ± 0.003	91.47 - 97.83
Actividad de agua		0.997 ± 0.002	0.996 - 0.997
Sólidos solubles (°Brix)		4.2 ± 0.2	4.1 - 4.3
Polifenoles totales (mg GAE/100g BS)		641.7 ± 68.7	24.4 – 1258.9
Capacidad antioxidante (mg TE/100g BS)		6643 ± 159	5212.7 - 8074.1
Dimensiones (mm)	Espesor	3	-
	Diámetro	60	-
Color	L*	25.98 ± 0.21	24.86 - 26.80
	a*	13.18 ± 0.08	10.09 - 12.53
	b*	13.67 ± 0.17	11.91 - 13.49

El contenido de humedad fue de 94.68%, siendo similar al valor informado por Sulbarán et al., (2011) quienes mencionan una humedad de 94.6% para la pulpa de tomate fresco.

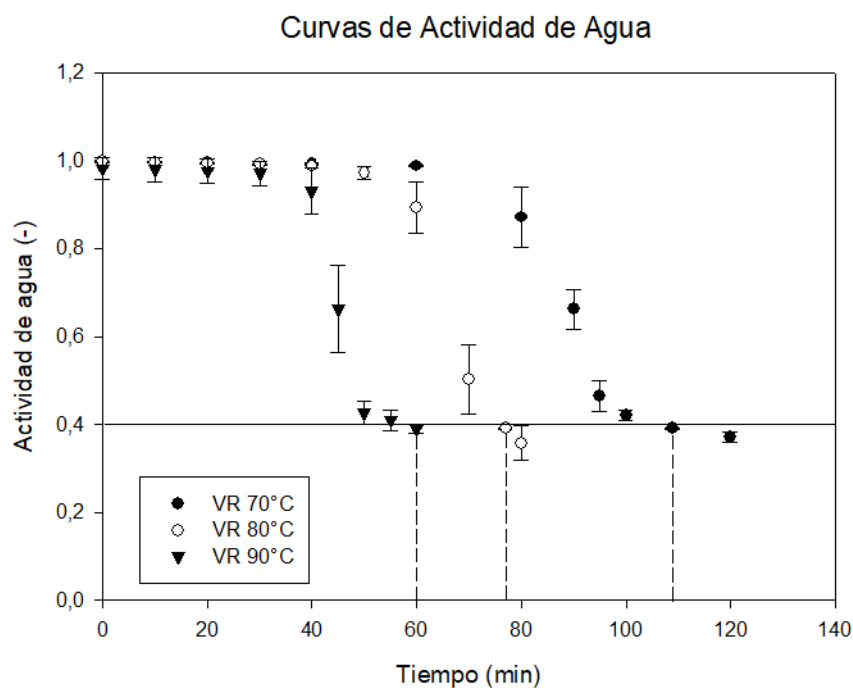
El contenido de polifenoles en tomate fresco fue de 641.7 ± 68.7 mg GAE/100 g BS, lo cual es cercano al valor reportado por el INTA (2021) de 680 mg GAE/100 g BS. También se encuentra dentro del rango reportado por Kerkhofs et al. (2005), quienes obtuvieron un contenido de polifenoles entre 568.2 ± 21.7 a 682.1 ± 9.3 mg GAE/ 100 g BS para tres variedades de Nueva Zelanda. Además, Santos et al. (2012) informó concentraciones similares en tomates frescos, donde el promedio fue de 699.8 ± 14.9 mg GAE/100 g BS.

La actividad antioxidante total corresponde a 353.42 mg TE/100 g BH para la pulpa de tomate. Esto se encuentra dentro del rango de valores indicados por Ilahy et al., (2010) los cuales variaron entre 266.37 a 579.39 mg TE/100 g BH para diferentes cultivos de tomates.

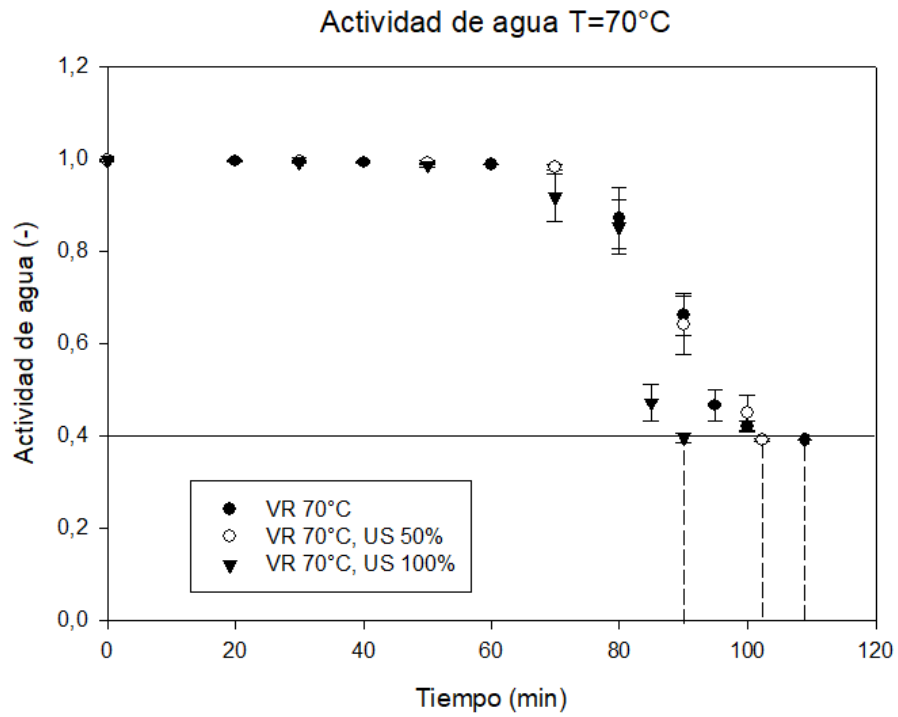
## 4.2 Tiempos de secado

Se determinó el tiempo de secado para cada condición de operación mediante el análisis de las curvas de actividad de agua, donde se establece como criterio que se debe alcanzar una actividad de agua inferior a 0.4 para detener el proceso, ya que, con una menor disponibilidad de agua en la superficie disminuyen las reacciones enzimáticas y la proliferación de microorganismos (Beuchat et al., 2013).

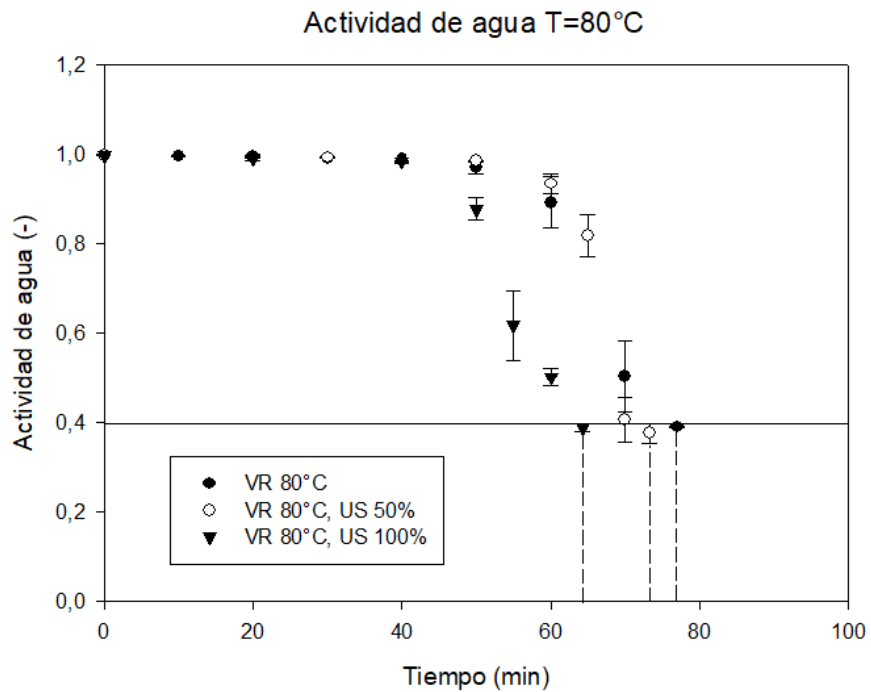
En la **Figura 9**, se pueden observar las curvas de actividad de agua para el secado en ventana refractiva a las temperaturas de 70, 80 y 90°C. En la **Figura 10** y **11** se muestran las curvas de actividad de agua para el secado con ventana refractiva acoplado con ultrasonido a 70 y 80°C, respectivamente.



**Figura 9.** Curvas de actividad de agua en ventana refractiva a 70, 80 y 90°C

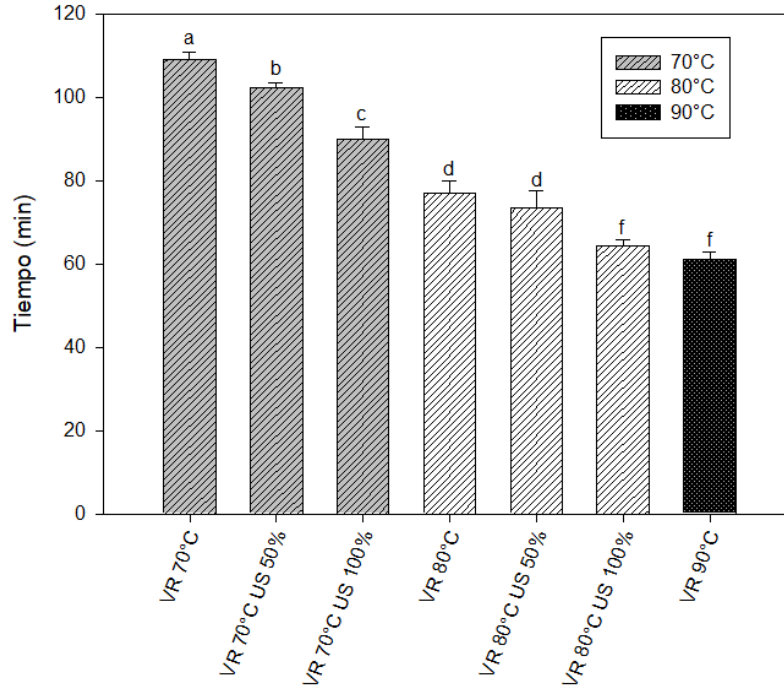


**Figura 10.** Curvas de actividad de agua en ventana refractiva acoplada a ultrasonido a 70°C



**Figura 11.** Curvas de actividad de agua en ventana refractiva acoplada a ultrasonido a 80°C

Los tiempos de secado se detallan en la **Figura 12** que se presenta a continuación.



**Figura 12.** Tiempos de secado para llegar a una  $A_w$  de 0.4 en las diferentes condiciones de operación<sup>1</sup>.

Como se puede apreciar los tiempos de secado a cada temperatura presentan diferencias significativas entre sí. En el caso de la ventana refractiva este presenta una disminución de 109 a 60 min a medida que la temperatura de operación aumenta de 70 a 90°C.

Además, al acoplar la sonda de ultrasonido en la ventana refractiva también se obtiene una reducción en los tiempos para cada temperatura evaluada. Esto se evidencia en el secado a 80°C donde existe una reducción de tiempos de 4.8% y 16.5% al utilizar una amplitud de 50% y 100%, respectivamente. Asimismo, a 70°C el tiempo de secado disminuye en un 6.1% y 17.4%, respectivamente. Siendo mayor el efecto del ultrasonido en el tiempo al trabajar a una mayor amplitud de onda y con temperaturas más bajas, debido a la relación que existe entre la energía mecánica que proporciona en sí el ultrasonido, y la energía térmica que proporciona el medio donde se implementa (Sabarez et al., 2012).

<sup>1</sup> Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

### 4.3 Tiempos de operación del ultrasonido y energía requerida.

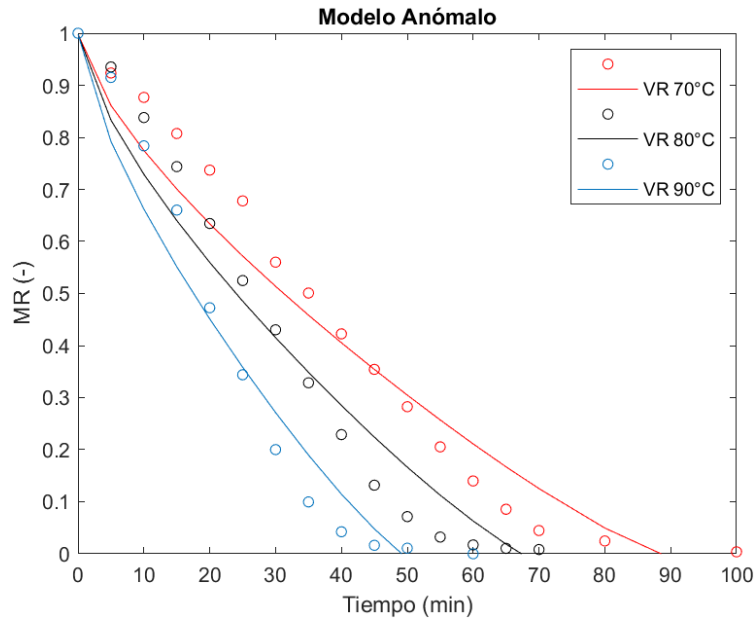
Con los resultados obtenidos en la sección 4.2 *Tiempos de secado*, se pudieron obtener los tiempos de funcionamiento del ultrasonido en cada uno de los secados realizados. Además, el equipo fue capaz de mostrar la energía total necesaria para operar con las amplitudes establecidas en las diferentes condiciones de secado (ver **Tabla 3**).

**Tabla 3.** Tiempos de funcionamiento del ultrasonido para las diferentes condiciones de secado.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Amplitud (%)</b>	<b>Tiempo de operación (min)</b>	<b>Energía requerida (J)</b>
70	50	76.7	227
70	100	67.5	379
80	50	55.0	139
80	100	48.2	301

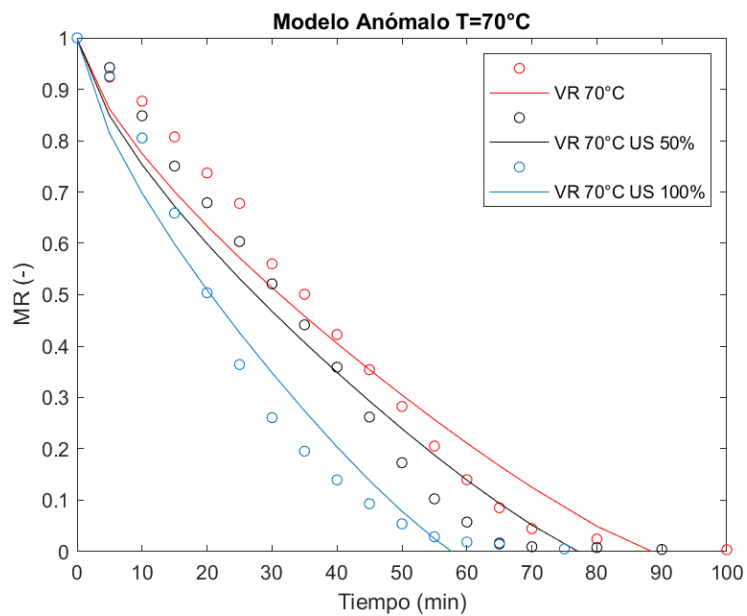
### 4.4 Cinética de secado

A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos en relación con la humedad del producto a través del tiempo. Además, en la **Figura 13** se incluyen los ajustes de las curvas mediante el modelo anómalo para la ventana refractiva y en la **Figura 14** y **15** se muestra el ajuste para la ventana refractiva con ultrasonido a 70°C y 80°C, respectivamente.



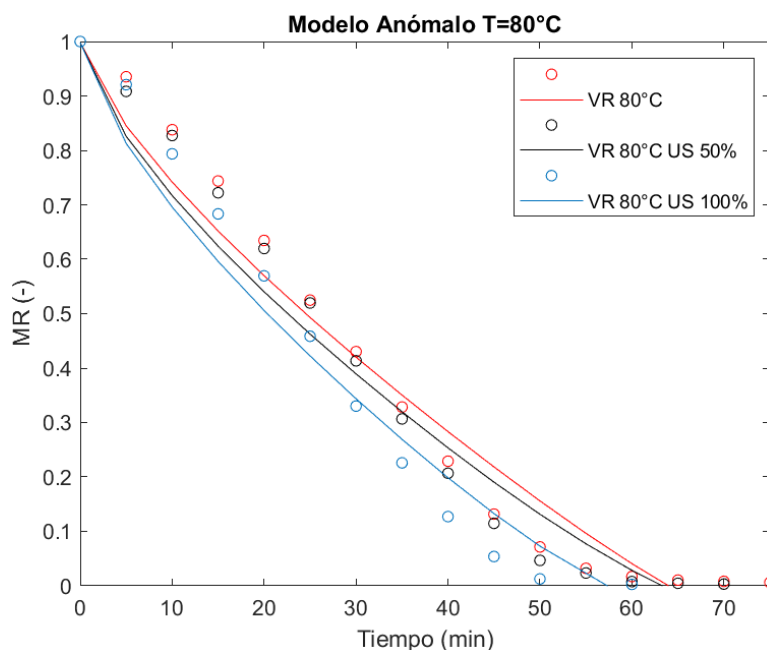
**Figura 13.** Ajuste de modelo Anómalo para el secado en ventana refractiva a 70, 80 y 90°C

En la **Figura 13** se presenta la comparación de las curvas de secado de la ventana refractiva para las 3 temperaturas de operación (70, 80 y 90°C). Como se puede apreciar la temperatura tiene un efecto directamente proporcional en la velocidad de secado del alimento; es decir, a mayor temperatura la velocidad de secado es mayor en comparación a cuando se tiene una menor temperatura, sometiendo al alimento a menores tiempos de secado.



**Figura 14.** Ajuste del modelo anómalo para el secado a 70°C en VR y VR+US

En la **Figura 14** se puede observar la diferencia de los datos de humedad cuando se acopla la sonda de ultrasonido a 70°C. Cuando la sonda opera con una amplitud del 50% no existe una diferencia significativa en comparación a la ventana refractiva. Sin embargo, al aumentar la amplitud del ultrasonido a 100%, los valores de humedad difieren de la ventana refractiva, específicamente en el intervalo de 20 a 70 min.



**Figura 15.** Ajuste del modelo anómalo para el secado a 80°C en VR y VR+US

Como se observa en la **Figura 15** cuando la temperatura es de 80°C el ultrasonido no produce un cambio importante entre las distintas condiciones de secado. Aun así, el comportamiento al aumentar la amplitud de la sonda es similar a cuando se trabaja a 70°C, ya que se genera un mayor efecto en la disminución de humedad cuando se trabaja a 100%.

En la **Tabla 4** que se presenta a continuación se pueden observar los parámetros obtenidos mediante el modelo anómalo, dentro de los cuales se encuentra el alfa ( $\alpha$ ), el coeficiente de difusión ( $D_{eff}$ ),  $R^2$  y la suma de errores cuadráticos (SEE). Se toma en consideración que el alfa no cambia cuando se tiene la misma estructura del alimento, por lo tanto, es posible ajustar todos los datos a un mismo valor, el cual está dado por el promedio de los valores de alfa encontrados para las distintas temperaturas estudiadas (Simpson et al., 2015).

**Tabla 4.** Parámetros obtenidos mediante el modelo anómalo.

<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Amplitud US</b> (%)	<b><math>\alpha</math></b>	<b>D<sub>eff</sub></b> (x10 <sup>-11</sup> m <sup>2</sup> /s <sup><math>\alpha</math></sup> )	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>SEE</b>
70	-	1.45	4.87	0.958	0.079
70	50	1.45	5.83	0.963	0.131
70	100	1.45	8.75	0.957	0.075
80	-	1.45	7.04	0.961	0.071
80	50	1.45	7.68	0.967	0.061
80	100	1.45	8.87	0.964	0.052
90	-	1.45	10.9	0.954	0.071

De la misma forma, en la **Tabla 5** se observan los parámetros obtenidos mediante el modelo basado en la segunda ley de Fick, donde se tiene el coeficiente de difusión, el R<sup>2</sup> y la suma de errores cuadráticos (SEE). A su vez, el ajuste del modelo a los datos experimentales se presenta en el **Anexo 7.1**.

**Tabla 5.** Parámetros obtenidos mediante el modelo basado en la segunda ley de Fick.

<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Amplitud US</b> (%)	<b>D<sub>eff</sub></b> (x10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s <sup><math>\alpha</math></sup> )	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>SEE</b>
70	-	1.17	0.858	0.292
70	50	1.41	0.855	0.291
70	100	2.08	0.898	0.189
80	-	1.73	0.866	0.297
80	50	1.77	0.862	0.271
80	100	1.89	0.863	0.219
90	-	2.27	0.856	0.224

Al comparar los valores de R<sup>2</sup> y SEE para ambos modelos se puede notar que el ajuste proporcionado por Fick no se adapta de buena manera a los datos experimentales. Sin embargo, se cumple que el coeficiente de difusión aumenta a medida que la temperatura de

operación incrementa. Asimismo, ocurre al aplicar el ultrasonido, donde un aumento de la amplitud resulta en un mayor coeficiente de difusión.

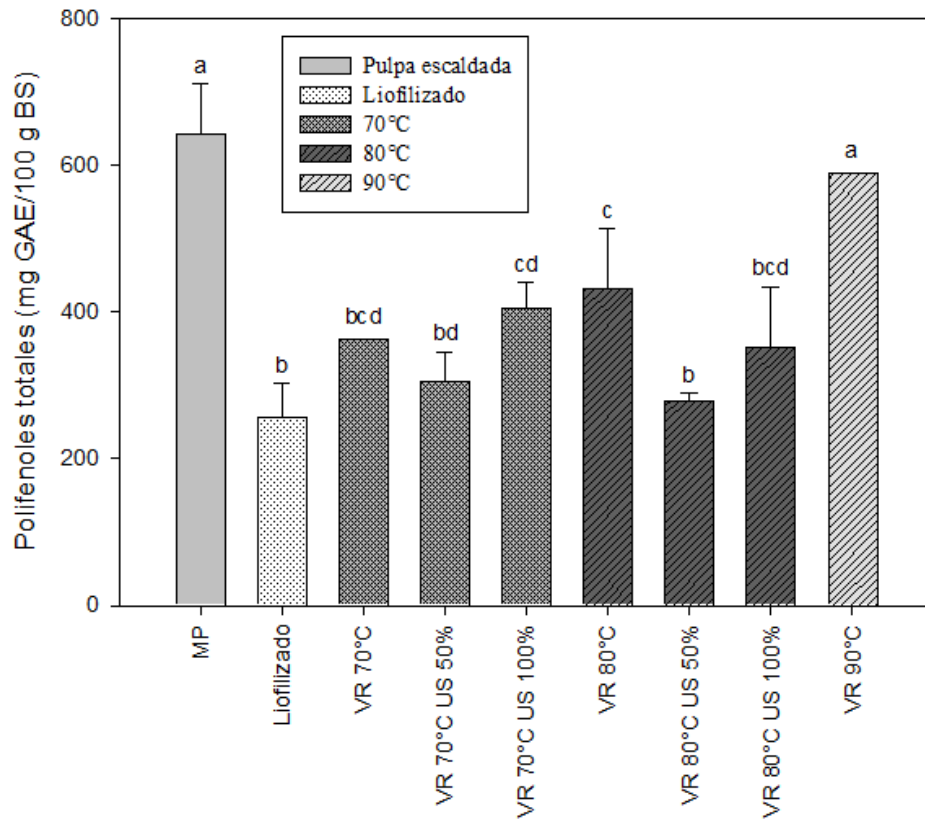
Por otra parte, los resultados experimentales también fueron comparados con el modelo anómalo, encontrándose una buena aproximación de los datos. Esto se evidencia para cada condición de secado, donde el valor de  $R^2$  resulta ser mayor a 0.9, lo cual indica una baja dispersión de los datos experimentales en relación con el modelo, sin embargo, no sucede lo mismo para el caso de Fick.

En cuanto al valor del alfa, este es mayor a 1, de lo que se infiere que el proceso presenta un comportamiento superdifusivo. Ahora bien, la difusividad de los alimentos normalmente es menor a la de otros materiales y tiene valores en un rango de  $10^{-13}$  a  $10^{-6}$  [ $m^2/s$ ], pero la mayoría de ellos (82%) se acumulan en la región de  $10^{-11}$  y  $10^{-8}$  (Marinos & Maroulis, 2006), por lo tanto, los resultados obtenidos del coeficiente de difusión tanto para el modelo anómalo como para Fick se encuentran dentro del rango de los valores reportados. Además, se puede apreciar que a medida que aumenta la temperatura el coeficiente de difusividad es mayor, por lo que existe una mayor migración de humedad en el secado a  $90^\circ C$ . De la misma forma ocurre con el secado con ultrasonido, donde a medida que aumenta la amplitud también aumenta el coeficiente de difusión, siendo el secado con ultrasonido más eficiente en la difusión de humedad que el secado con ventana refractiva por sí solo. Esto debido a los micro canales generados por las ondas de ultrasonido, que reducen la resistencia interna a la transferencia de masa y disminuyen la capa límite en la interfase sólido-gas (Brines et al., 2015) facilitando la salida del agua del alimento hacia la superficie.

#### **4.5 Contenido de polifenoles totales (TPC)**

En la **Figura 16** se presentan los resultados del contenido de polifenoles totales para la pulpa de tomate escaldada y el polvo de tomate seco obtenido de las distintas condiciones de secado.

### Contenido de Polifenoles Totales



**Figura 16.** Contenido de polifenoles totales en el producto a diferentes condiciones de secado<sup>2</sup>.

Como se puede observar en la **Figura 16** el secado en ventana refractiva a 90°C es el método que conserva un mayor contenido de polifenoles de los que se tenía inicialmente en la pulpa de tomate escaldada, lo cual coincide con lo expresado por Dewanto et al., (2002), quien señala que, con un tratamiento de secado a alta temperatura, específicamente a 88°C no existen cambios significativos en el contenido de polifenoles. Esto debido a la inactivación de enzimas oxidativas e hidrolíticas responsables de la destrucción de ácidos fenólicos que son liberados durante el procesamiento térmico.

Con respecto a esto y al analizar los resultados obtenidos en los otros tratamientos, se deduce que al exponer al alimento a menores temperaturas (70 y 80°C) por más tiempo se produce

<sup>2</sup> Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

una disminución en el contenido de polifenoles totales, pues existe una mayor posibilidad de que estas enzimas oxidativas, como la polifenoloxidasa y la peroxidasa se activen y provoquen la pérdida de complejos fenólicos. Los resultados del contenido de polifenoles totales para las muestras deshidratadas a las distintas condiciones de secado fueron similares a las obtenidas por Gümüşay et al., (2015) para rodajas de tomates secadas al sol, horno y horno con vacío, donde el TPC fue de  $314.27 \pm 42.30$ ,  $346.10 \pm 49.68$ ,  $355.79 \pm 28.38$  mg GAE/100g BS, respectivamente. Las muestras secadas a  $90^{\circ}\text{C}$  en ventana refractiva presentan un contenido de polifenoles semejante al producto obtenido mediante el secado con vacío y secado por convección a  $80^{\circ}\text{C}$  durante 4 horas que realizó Zalewska et al., (2022), donde se obtuvo un TPC de  $33.66 \pm 1.38$  y  $33.67 \pm 1.53$  mg GAE/100g BH.

En cuanto al ultrasonido, este no presentó diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) con el secado en ventana refractiva a  $70^{\circ}\text{C}$  y a  $80^{\circ}\text{C}$  cuando se trabajó con una amplitud del 100%, pues el TPC sólo se redujo en un 36.8 y 45.2%, respectivamente. Sin embargo, cuando la amplitud fue del 50% y la temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ , hubo una disminución del 56.5% en el contenido de polifenoles totales con respecto a la pulpa de tomate fresca. Aun así, se observa que los datos obtenidos con la aplicación del ultrasonido son relativamente menores a los obtenidos en el secado con ventana refractiva; a excepción del secado a  $70^{\circ}\text{C}$  con amplitud del 100%, por lo que se puede concluir que el ultrasonido afecta desfavorablemente la retención de polifenoles en las muestras.

La cavitación del ultrasonido produce cambios en la matriz del alimento (Mosqueras et al., 2019). Esta alteración de las paredes celulares, sumado al efecto de las altas temperaturas puede desencadenar y acelerar la liberación de las enzimas oxidativas e hidrolíticas, favoreciendo la destrucción de los compuestos fenólicos y antioxidantes (Chang et al., 2006).

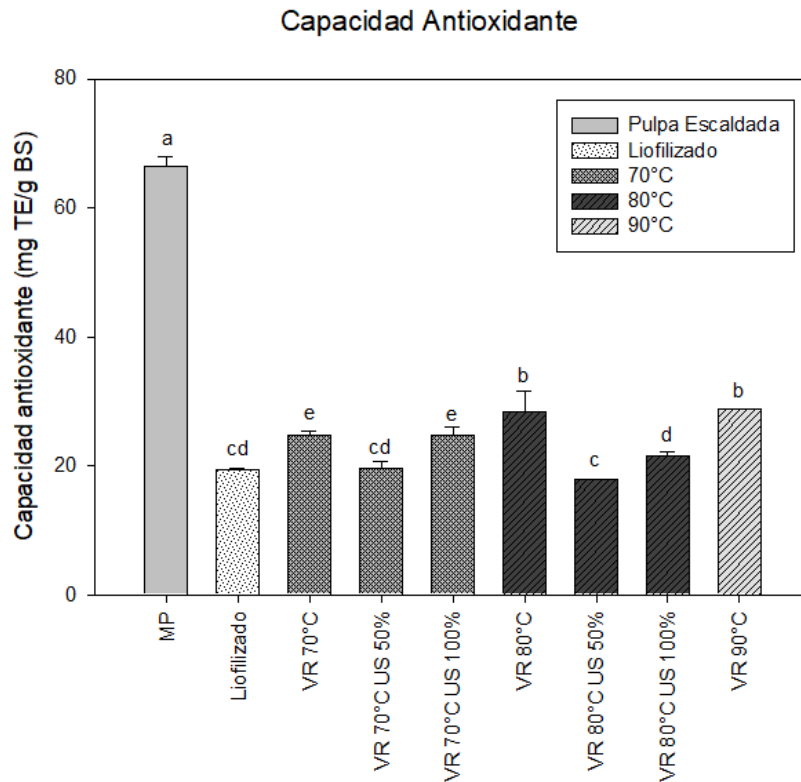
Además, la naturaleza de los polifenoles hace que sean compuestos relativamente hidrófilos, por lo que los polifenoles libres, que incluyen agliconas, glucósidos y oligómeros, se extraen fácilmente utilizando agua (Rojas, 2021). La quercetina es uno de los principales y más importantes flavonoles presentes en el tomate, y se puede encontrar en su forma glicosilada como rutina con concentraciones de hasta 4.5 mg/ 100 g BH (Slimestad et al., 2008).

Esto podría ser motivo por el cual los productos obtenidos con ultrasonido tienen un menor contenido de polifenoles comparado con la ventana refractiva, pues el ultrasonido facilita la extracción de estos compuestos hacia el agua presente en el alimento, siendo arrastrados y eliminados al ambiente por el vapor generado durante el proceso.

Con relación al liofilizado, este fue el que obtuvo la menor concentración de polifenoles. Lacuesta (2021) informó resultados similares para el secado de distintas muestras de zumo de naranja, donde el proceso de liofilización disminuyó de forma significativa ( $P < 0.05$ ) la cantidad de compuestos fenólicos y antioxidantes presentes en todas las muestras. Esto puede explicarse como consecuencia de la etapa de congelación que ocurre en el proceso de liofilización, el cual genera que las células del alimento se alteren, descomprimiendo ciertos tipos de enzimas, sustratos y activadores, causantes de la degradación de algunos compuestos fenólicos (Shofian et al., 2011).

#### **4.6 Capacidad antioxidante (AA)**

De igual forma, en la **Figura 17** se presentan los resultados de la capacidad antioxidante para la pulpa de tomate y el producto seco obtenido en las diferentes condiciones de secado.



**Figura 17.** Capacidad antioxidante de la materia prima y el producto seco a diferentes condiciones de secado<sup>3</sup>.

En la **Figura 17** se observa que todos los métodos de secado (ventana refractiva, ventana refractiva con ultrasonido y liofilizado) afectan de forma significativa ( $P < 0.05$ ) a los compuestos antioxidantes presentes en la pulpa de tomate. A pesar de esto, se obtienen mayores concentraciones en las muestras secadas en ventana refractiva a 80 y 90°C, seguido de las muestras secadas a 70°C en ventana refractiva y con la aplicación de ultrasonido 100%.

En la tabla del **Anexo 7.4** se puede apreciar de forma más detallada la actividad antioxidante de cada uno de los secados realizados. Estos valores son similares a los obtenidos por Kerkhofs et al. (2005), para el secado de tomates con aire caliente, los cuales resultaron con una actividad antioxidante total entre  $1325.5 \pm 31.5$  a  $2192.5 \pm 82.1$  mg TE/100 g BS para distintos cultivares.

<sup>3</sup> Letras minúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

Al analizar la influencia del ultrasonido en el proceso, se puede notar que este afecta de forma negativa la retención de los compuestos antioxidantes comparado con la ventana refractiva cuando se opera a 80°C, dado que existe una reducción de la AA de un 67.5 y 73.2% cuando se opera a 100% y 50% de amplitud, respectivamente. Esto es similar a lo obtenido por Costa et al. (2014) donde el uso de ultrasonido a altas temperaturas de secado redujo el contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante de la cascara de maracuyá, lo cual puede ser ocasionado por el daño celular que ocurre debido a la combinación de estos factores (Rodríguez et al., 2014). Para el caso de 70°C, el ultrasonido contribuyó en un 70.6% la disminución de la actividad antioxidante cuando la amplitud fue del 50%. Opalić et al., (2009) estudiaron distintos tiempos de operación del ultrasonido como pretratamiento para el secado con aire caliente y obtuvieron que los tiempos prolongados con ultrasonido (54 min), produjeron la mayor pérdida de compuestos fenólicos y de la capacidad antioxidante en manzanas deshidratadas. Esto explicaría la disminución en la actividad antioxidante de las muestras secadas con ultrasonido a 50%.

A su vez, el liofilizado presenta una capacidad antioxidante de 1944 mg TE/100 g BS, similar a lo reportado en literatura por Gümüşay et al., (2015) de 1699.59 mg TE/100 g BS. Este valor se sitúa por debajo a lo alcanzado mediante el secado en ventana refractiva, lo cual podría atribuirse al extenso tiempo que requiere el proceso de liofilización. Esto concuerda con lo informado por Tahmasebi & Emam-Djomeh (2021), quienes concluyeron que, a pesar de trabajar a bajas temperaturas, el uso de tiempos prolongados en el proceso de secado puede afectar en gran medida la degradación de los compuestos como el licopeno. Asimismo, ocurre con el deterioro del ácido ascórbico, el cual contribuye a la actividad antioxidante de la fracción soluble en agua en tomates y que, si bien se ve afectado principalmente por el efecto de la temperatura, también se ve perjudicado por los largos tiempos de secado que se tienen a bajas temperaturas (Santos et al., 2012).

La etapa de madurez afecta las propiedades antioxidantes de una misma variedad de tomate como también a los distintos tipos de cultivares (Hdider et al., 2013)

#### **4.7 Color**

En los últimos años se le ha prestado mucha más atención a la calidad de los alimentos durante el secado, pues los cambios fisicoquímicos que ocurren en los tejidos son capaces de

afectar diferentes propiedades. Dentro de ellas, el color es una de las más importantes para la aceptabilidad de los consumidores (Krokida et al., 2001).

Es aquí donde la liofilización aparece, pues los alimentos sometidos a este método han presentado mejores resultados en la retención de color, comparado a métodos convencionales, teniendo productos con características de color mejoradas (Duan et al., 2013). En la **Figura 18** se presenta la pulpa de tomate liofilizada, que se utiliza como referencia para la comparación de color de las muestras obtenidas.



**Figura 18.** Pulpa de tomate liofilizada (referencia).

En las **Figura 19**, se observa el polvo de tomate seco obtenido mediante ventana refractiva a distintas temperaturas, mientras que en la **Figura 20** y **21** se observa el color de los productos obtenidos al acoplar la sonda de ultrasonido a una temperatura de 70 y 80°C, respectivamente.



**Figura 19.** Polvo de tomate obtenido en ventana refractiva a 70, 80 y 90°C, respectivamente.



**Figura 20.** Polvo de tomate obtenido a 70°C en VR, VR+US50% y VR+US100%, respectivamente.



**Figura 21.** Polvo de tomate obtenido a 80°C en VR, VR+US50% y VR+US100%, respectivamente.

En la **Tabla 6** se muestran los parámetros de coordenadas CIEI\*a\*b\* para las distintas condiciones de secado a las cuales fue sometida la pulpa de tomate. Al comparar estos resultados con las imágenes de la **Figura 19, 20 y 21**, se puede ver que no todos los datos concuerdan con lo que se aprecia visualmente, ya que estos valores corresponden al promedio de muestras provenientes de distintos lotes de secado y, por ende, productos obtenidos de tomates con distintos grados de maduración y de diferentes estaciones del año.

**Tabla 6.** Parámetros de coordenadas CIEl\*a\*b\* en el producto final a distintas condiciones de secado.

Condición de secado	L*	a*	b*
<b>Liofilizado</b>	50.96 ± 0.80 <sup>a</sup>	15.13 ± 0.63 <sup>bcde</sup>	18.04 ± 1.61 <sup>a</sup>
<b>VR 70°C</b>	48,14 ± 0.01 <sup>abc</sup>	16,94 ± 0.01 <sup>ab</sup>	20,83 ± 0.02 <sup>ab</sup>
<b>VR 70°C US 50%</b>	42.81 ± 2.17 <sup>cd</sup>	17.55 ± 1.04 <sup>a</sup>	20.36 ± 1.12 <sup>ab</sup>
<b>VR 70°C US 100%</b>	47.46 ± 0.01 <sup>abcd</sup>	16.50 ± 0.01 <sup>abc</sup>	21.77 ± 0.01 <sup>b</sup>
<b>VR 80°C</b>	48.34 ± 1.57 <sup>ab</sup>	14.01 ± 1.95 <sup>e</sup>	22.03 ± 0.31 <sup>b</sup>
<b>VR 80°C US 50%</b>	42.73 ± 0.13 <sup>d</sup>	15.71 ± 0.06 <sup>bcd</sup>	20.72 ± 0.43 <sup>ab</sup>
<b>VR 80°C US 100%</b>	48.23 ± 4.61 <sup>ab</sup>	15.02 ± 0.02 <sup>cde</sup>	22.71 ± 3.96 <sup>b</sup>
<b>VR 90°C</b>	44.74 ± 6.63 <sup>bcd</sup>	14.27 ± 0.11 <sup>de</sup>	21.89 ± 3.38 <sup>b</sup>

\*Letras minúsculas diferentes en una misma columna representan diferencias significativas (p < 0.05)

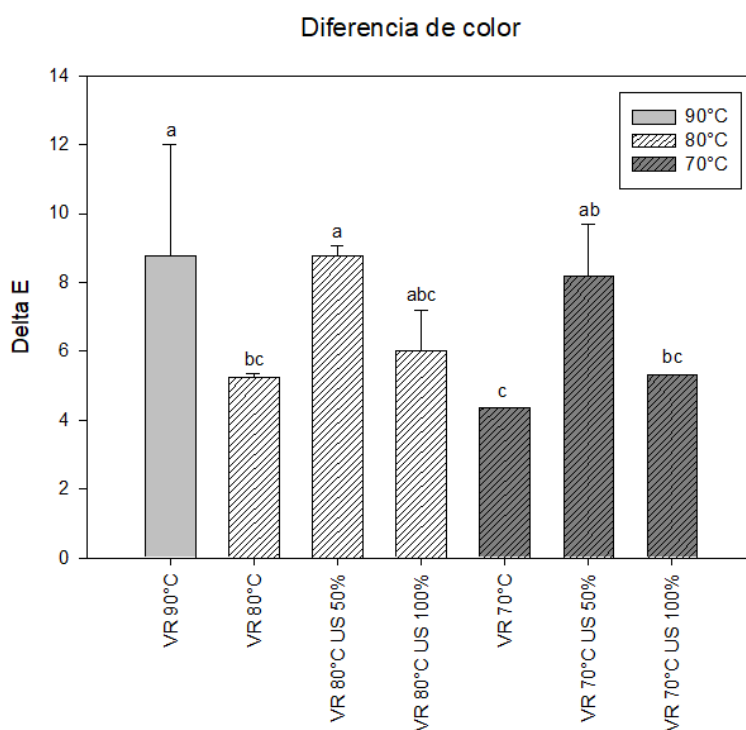
Los resultados de la **Tabla 6** muestran que el parámetro L\* cambió significativamente (P < 0.05) para el secado en ventana refractiva a 90°C y el secado a 70 y 80°C con ultrasonido, usando 50% de amplitud. El valor de L\* presenta una disminución, lo que indica que el producto muestra un tono más oscuro siendo poco atractivo a la vista del consumidor. (Urfalino & Worlock, 2016). Este cambio de color se debe al pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard) y la oxidación del ácido ascórbico que ocurre con un secado a temperaturas altas o tiempos de exposición prolongados donde se generan compuestos con tonos marrones (Morales, 2020). Sin embargo, se puede ver que no existe un efecto negativo en este parámetro al aumentar la temperatura de 70 a 80°C, ya que las muestras del secado en ventana refractiva como el secado con ultrasonido a 100% no presentaron oscurecimiento.

Otro parámetro relevante para analizar la influencia del secado en el producto de interés corresponde al valor de a\*. Como se mencionó en la sección 3.3.4 *Determinación de color*, el valor de a\* toma valores positivos para los colores rojizos y en el caso del tomate este color es lo que lo diferencia de muchos otros alimentos, además de estar relacionado directamente con el aporte de licopeno (Castoldi et al., 2014). Prácticamente todos los métodos realizados obtuvieron buenos resultados en la retención del color rojo de la pulpa de tomate, lo cual puede explicarse por el escaldado previo que se realizó al alimento antes

de someterlo al proceso de secado que logra una menor degradación del licopeno (Aguilar et al., 2015). Aun así, los valores más bajos de  $a^*$  se presentaron para el producto obtenido a altas temperaturas (80 y 90°C).

En cuanto al parámetro  $b^*$ , este toma valores positivos para los tonos más amarillentos, los cuales se dan a menores temperaturas.

De forma más general, en la **Figura 22** se detalla la diferencia de color ( $\Delta E$ ) entre los distintos secados y el producto liofilizado.



**Figura 22.** Diferencias de color del polvo de tomate obtenido en los distintos secados con relación al liofilizado.

Como se puede observar, cuando se trabajó a una temperatura de 70 y 80°C las muestras secadas en ventana refractiva y con la asistencia de ultrasonido al 100%, presentaron menores diferencias de color con el producto liofilizado; aproximadamente un  $\Delta E$  de 5. Esto indica que el producto presenta diferencias de color apreciables a simple vista, pero aun así se sigue conservando las tonalidades iniciales del producto.

## **V. CONCLUSIONES**

## 5. Conclusiones

La incorporación de la tecnología ultrasónica en los procesos con ventana refractiva resulta en un sistema sencillo de acoplar que reduce los tiempos de secado hasta en un 17%.

En particular, las muestras secadas con ondas ultrasónicas de elevada intensidad (US100%) a bajas temperaturas (70°C) presentan mejores resultados en la retención de compuestos bioactivos; de hasta un 37.2% para la capacidad antioxidante y 63.2% del contenido de polifenoles. Asimismo, el producto obtenido a estas condiciones presenta una menor diferencia de color con el producto liofilizado y, por ende, un mejor aspecto.

Esto se atribuye a la relación que existe entre la energía mecánica que proporciona en sí el ultrasonido, y la energía térmica que proporciona el medio donde se implementa, por lo que es necesario buscar el equilibrio entre la amplitud seleccionada, temperatura de operación y tiempo de aplicación del ultrasonido para lograr óptimos resultados. Siendo una alternativa prometedora para la deshidratación de alimentos, especialmente para aquellos que son vulnerables a las altas temperaturas, logrando aminorar tiempos y costos energéticos.

## **VI. REFERENCIAS**

## 6. Referencias

Aguilar, M., Quezada, T., Abraján, M., Ochoa, Y. & Vasco, N. (2015). Efecto de pretratamientos aplicados a la deshidratación de tomate sobre la cantidad de licopeno, 2(2), 238-245. Ecorfan.

Anton, D., Bender, I., Kaart, T., Roasto, M., Heinonen, M., Luik, A., & Püssa, T. (2017). Changes in Polyphenols Contents and Antioxidant Capacities of Organically and Conventionally Cultivated Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fruits during Ripening. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017, e2367453. <https://doi.org/10.1155/2017/2367453>

Baeghbali, V., Mehrdad Niakousari, Michael O. Ngadi & Mohammad Hadi Eskandari (2019) Combined ultrasound and infrared assisted conductive hydro-drying of apple slices, *Drying Technology*, 37:14, 1793-1805, DOI: 10.1080/07373937.2018.1539745

Beuchat, L. R., Komitopoulou, E., Beckers, H., Betts, R. P., Bourdichon, F., Fanning, S., Joosten, H. M., & Ter kuile, B. H. (2013). Low--Water Activity Foods: Increased Concern as Vehicles of Foodborne Pathogens. *Journal of Food Protection*, 76(1), 150–172. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-211>

Brines, C., Mulet, A., García-Pérez, J. V., Riera, E., Cárcel, J. A. (2015). Influence of the Ultrasonic Power Applied on Freeze Drying Kinetics, *Physics Procedia*, Volume 70, 850-853. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.174>.

Calvo, C., Durán, L. 1997. Propiedades físicas II: Ópticas y color. *Temas en Tecnología de Alimentos*. Editado por J.M. Aguilera. Instituto Politécnico Nacional, México.

Castillo, T. (2016). Efecto del pretratamiento con ultrasonido de alta intensidad en carne fresca de cerdo para la elaboración de una emulsión cárnica embutida reducida en fosfatos. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de ingeniería química. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/2442>

Castoldi, M., Zotarelli, M., Durigon, A., Carciofi, B., & Laurindo, J. (2014). Production of Tomato Powder by Refractance Window Drying. *Drying Technology*, 33, 150527095541008. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.989327>

Chang, C.-H., Lin, H.-Y., Chang, C.-Y., & Liu, Y.-C. (2006). Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.061>

Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813.

[https://www.academia.edu/24452054/Applications\\_of\\_ultrasound\\_in\\_food\\_technology\\_Processing\\_preservation\\_and\\_extraction](https://www.academia.edu/24452054/Applications_of_ultrasound_in_food_technology_Processing_preservation_and_extraction)

Chen, X., & Majumdar, A. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. Wiley-Blackwell.

Chen, Z.-G., Guo, X.-Y., & Wu, T. (2016). A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 30, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.026>

Chile, F., & Adimark, G. F. K. (2014). Chile saludable: oportunidades y desafíos de innovación. <http://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/145873>

Coman, V., Teleky, B. E., Mitrea, L., Martău, G. A., Szabo, K., Călinoiu, L. F., & Vodnar, D. C. (2020). Chapter Five - Bioactive potential of fruit and vegetable wastes. In F. Toldrá (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 91, pp. 157–225). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.07.001>

Costa, E., Ramírez, J. L., Pérez-Muelas, N., Riera, E., & Cárcel, J. (2014). Efectos de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad durante el secado en la capacidad antioxidante de piel de Maracuyá. *Tecniacústica* (pp. 1429-1436). <https://doi.org/10.13140/2.1.1190.1122>

Cruz Bojórquez, R. M., González Gallego, J., & Sánchez Collado, P. (2013). Propiedades funcionales y beneficios para la salud del licopeno. *Nutrición Hospitalaria*, 28(1), 6–15. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.1.6302>

Demiray, E., Tulek, Y., & Yilmaz, Y. (2013). Degradation kinetics of lycopene,  $\beta$ -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT - Food Science and Technology*, 50(1), 172–176. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.06.001>

Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–3014. <https://doi.org/10.1021/jf0115589>

Domínguez, R., Gullón, P., Pateiro, M., Munekata, P. E. S., Zhang, W., & Lorenzo, J. M. (2020). Tomato as Potential Source of Natural Additives for Meat Industry. A Review. *Antioxidants*, 9(1), 73. <https://doi.org/10.3390/antiox9010073>

Duan, X., Ding, L., Ren, G., Liu, L., & Kong, Q. (2013). The drying strategy of atmospheric freeze drying apple cubes based on glass transition. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 534–538. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.06.005>

Duchitanga Torres, P. G. (2018). Análisis de la capacidad antioxidante de frutas y verduras sometidos a congelación y liofilización. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8405>

Ramón, C., & Gil, M. (2021). Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: una revisión tecnológica, 24(51), e1822. <https://doi.org/10.22430/22565337.1822>

Fito, P., Andrés, A. M., Barat, J. M., Albors, A. M. (2020). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

Flaño A. (2013). Situación del tomate para el consumo fresco. Ministerio de Agricultura. Obtenido de [https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/08/11729\\_ArtTomateFresco2013.pdf](https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/08/11729_ArtTomateFresco2013.pdf)

Gümüşay, Ö., Borazan, A., Ercal, N., & Demirkol, O. (2015). Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. *Food Chemistry*, 173, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.162>

Hdider, C., Ilahy, R., Imen, T., Lenucci, M., & Dalessandro, G. (2013). Effect of the stage of maturity on the antioxidant content and antioxidant activity of high-pigment tomato cultivars grown in Italy (Vol. 7).

Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>

Ibarz, Albert. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. Pag 590

Ilahy, R., Hdider, C., Lenucci, M., Imen, T., & Dalessandro, G. (2010). Antioxidant activity and bioactive compound changes during fruit ripening of high-lycopene tomato cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.11.003>

Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos (2021). Base de datos de actividad antioxidante (ORAC) y de contenido de polifenoles totales (PFT) en hortalizas. Universidad de Chile. <https://portalantioxidantes.com/base-de-datos-de-actividad-antioxidante-orac-y-de-contenido-de-polifenoles-totales-pft-en-hortalizas-2/>

Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2011). The Physical and Chemical Effects of Ultrasound. In H. Feng, G. Barbosa-Canovas, & J. Weiss (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing* (pp. 1–12). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_1)

Kerkhofs, N. S., Lister, C. E., & Savage, G. P. (2005). Change in Colour and Antioxidant Content of Tomato Cultivars Following Forced-Air Drying. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60(3), 117–121. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-6839-8>

Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2001). The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(1), 53–59. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00426.x>

Lacuesta Martínez, S. (2021). Efecto de la temperatura de liofilización en los compuestos bioactivos y capacidad antioxidante del zumo de naranja y su coproducto. *Universitat Politècnica de València*. <http://hdl.handle.net/10251/173558>

Ledesma, L. A. G. (2018). Evaluación de la aplicación del método de ventana refractiva en la deshidratación de pulpa de mango (*Mangifera indica* L.). *Ingeniería y Región*, 20, 46–51. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7059319>

Leiton Ramírez, Y. M. (2016). Evaluación del método de secado por ventana de refractancia TM en pulpa de guayaba (*Psidium guajava*). <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/9323>

Llabrés Campaner, P. J. (2013). Intensificación de procesos mediante la aplicación de ultrasonidos de potencia. Influencia sobre las cinéticas de secado. <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/311>

Luna, M., & Delgado, A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). <http://ww.ucol.mx/revaia/pdf/2014/enero/5.pdf>.

Mahanti, N. K., Chakraborty, S. K., Sudhakar, A., Verma, D. K., Shankar, S., Thakur, M., Singh, S., Tripathy, S., Gupta, A. K., & Srivastav, P. P. (2021). Refractance Window-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments. *Future Foods*, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>

Marinos, D., & Maroulis, Z. (2006). Transport properties in the drying of solids, in *Handbook of drying technology*. Chapter 4. 3th Ed.

Martí Renau, R. (2018). Metodologías para la evaluación del contenido en polifenoles en tomate aplicadas al estudio del efecto del genotipo y de estrategias de cultivo respetuosas con el medio ambiente. <https://doi.org/10.6035/14104.2018.168948>

Martínez Estay, N. C. (2019). Acción de los antioxidantes presentes en los alimentos sobre la aterosclerosis. <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12245>

Meléndez-Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2004). Estabilidad de los pigmentos carotenoides en los alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 54(2), 209–215. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0004-06222004000200011&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0004-06222004000200011&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Morales Peralta, F. S. (2020). Cinética de degradación de polifenoles y formación de hidroximetilfurfural en extractos de vainas de tara (*Caesalpinia spinosa*) sometidos a tratamientos térmicos. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176782>

Moreiras, O., Carbajal, Á., Cabrera, L., & Cuadrado, C. (2013). Tablas de composición de alimentos (16 ed., Vol. 1). Pirámide. Obtenido de [https://catedraalimentacioninstitucional.files.wordpress.com/2014/09/3-1-tablas\\_de\\_composicion\\_de\\_alimentos.pdf](https://catedraalimentacioninstitucional.files.wordpress.com/2014/09/3-1-tablas_de_composicion_de_alimentos.pdf)

Mosquera-Vivas, E. S., Ayala-Aponte, A. A., & Serna-Cock, L. (2019). Ultrasound and Osmotic Dehydration as Pre-treatments to Melon (*Cucumis melo* L.) Drying by Freeze-drying. *Información Tecnológica*, 30(3), 179–188. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300179>

Opalić, M., Domitran, Z., Komes, D., Belščak, A., Horžić, D., & Karlović, D. (2009). The Effect of Ultrasound Pre-Treatment and Air-Drying on the Quality of Dried Apples. *Czech Journal of Food Sciences*, 27(1), 297–300. <https://doi.org/10.17221/606-CJFS>

Palomo, G. I., Fuentes Q, E., Carrasco S, G., González R, D., & Moore-Carrasco, R. (2010). Actividad Antioxidante, Hipolipemiente y antiplaquetaria del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y el efecto de su procesamiento y almacenaje. *Revista Chilena de Nutrición*, 37(4), 524–533. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182010000400014>

Quiñones, M., Miguel, M., & Aleixandre, A. (2012). Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*, 27(1), 76–89. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0212-16112012000100009&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0212-16112012000100009&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Razifard, H., Ramos, A., Della Valle, A. L., Bodary, C., Goetz, E., Manser, E. J., Li, X., Zhang, L., Visa, S., Tieman, D., van der Knaap, E., & Caicedo, A. L. (2020). Genomic Evidence for Complex Domestication History of the Cultivated Tomato in Latin America. *Molecular Biology and Evolution*, 37(4), 1118–1132. <https://doi.org/10.1093/molbev/msz297>

Robles-Ozuna, L. E., & Ochoa--Martínez, L. A. (2012). Ultrasonido Y Sus Aplicaciones En El Procesamiento De Alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 109–122. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81325441002>

Rodríguez, J. V. G., Hernández, B. A. C., Martínez, R., Esteban, M. L., & Corona, J. L. H. (2013). Fortificación de pan a base de tomate deshidratado (*Lycopersicon esculentum* mil) en Tlaxcala. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 32, 221-229. ISSN: 1409-9282. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14125584006>

Rodríguez, Ó., Santacatalina, J. V., Simal, S., Garcia-Perez, J. V., Femenia, A., & Rosselló, C. (2014). Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.01.001>

Rojas Muñoz, F. S. (2021). Revisión bibliográfica de compuestos fenólicos, su efecto en la salud, métodos de encapsulación y digestión simulada in vitro. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185432>

Sabarez, H., Gallego-Juarez, J., & Riera, E. (2012). Ultrasonic-Assisted Convective Drying of Apple Slices. *Drying Technology*, 30(9), 989–997. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.677083>

Santos-Sánchez, N. F., Valadez-Blanco, R., Gómez-Gómez, M. S., Pérez-Herrera, A., & Salas-Coronado, R. (2012). Effect of rotating tray drying on antioxidant components, color and rehydration ratio of tomato saladette slices. *LWT - Food Science and Technology*, 46(1), 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.09.015>

Schössler, K., Jäger, H., & Knorr, D. (2012). Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.018>

Shi, J. (2008). Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. *Critical Reviews in Biotechnology*, 20. <https://doi.org/10.1080/10408690091189275>

Shofian, N. M., Hamid, A. A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Pak Dek, M. S., & Hairuddin, M. R. (2011). Effect of Freeze-Drying on the Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity of Selected Tropical Fruits. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(7), 4678–4692. <https://doi.org/10.3390/ijms12074678>

Simpson, R., Jaques, A., Nuñez, H., Ramirez, C., & Almonacid, A. (2013). Fractional Calculus as a Mathematical Tool to Improve the Modeling of Mass Transfer Phenomena in Food Processing. *Food Engineering Reviews*, 5(1), 45–55. <https://doi.org/10.1007/s12393-012-9059-7>

Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H., & Jaques, A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027>

Singham, P., & Birwal, P. (2014). Technological Revolution in Drying of Fruit and Vegetables. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3.

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>

Slimestad, R., Fossen, T., & Verheul, M. J. (2008). The Flavonoids of Tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(7), 2436–2441. <https://doi.org/10.1021/jf073434n>

Sonawane, A., Chauhan, O. P., Semwal, S. D., & Semwal, A. D. (2021). Drying characteristics and lycopene degradation kinetics of tomato soup. *Chemical Data Collections*, 35, 100757. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2021.100757>

Song, X., Luo, Y., Ma, L., Hu, X., Simal-Gandara, J., Wang, L.-S., Bajpai, V. K., Xiao, J., & Chen, F. (2021). Recent trends and advances in the epidemiology, synergism, and delivery system of lycopene as an anti-cancer agent. *Seminars in Cancer Biology*, 73, 331–346. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2021.03.028>

Srivstava, S., & Kulshrestha, K. (2013). Nutritional Content and Significance of Tomato Powder. *Annals of Arid Zone* 52(2), 121-124. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/317286254\\_Nutritional\\_Content\\_and\\_Significance\\_of\\_Tomato\\_Powder/citations](https://www.researchgate.net/publication/317286254_Nutritional_Content_and_Significance_of_Tomato_Powder/citations)

Sulbarán, B., Sierra, E., Rodríguez, G. O. de, Berradre, M., Fernández, V., & Peña, J. (2011). Evaluación de la actividad antioxidante del tomate crudo y procesado. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 28(2). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26885>

Tahmasebi, M., & Emam-Djomeh, Z. (2021). Lycopene degradation and color characteristics of fresh and processed tomatoes under the different drying methods: a comparative study. *Chemical Papers*, 75(7), 3617–3623. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01611-0>

Tan, S., Ke, Z., Chai, D., Miao, Y., Luo, K., & Li, W. (2021). Lycopene, polyphenols and antioxidant activities of three characteristic tomato cultivars subjected to two drying methods. *Food Chemistry*, 338, 128062. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128062>

Tylewicz, U., Nowacka, M., Martín-García, B., Wiktor, A., & Gómez Caravaca, A. M. (2018). 5 - Target sources of polyphenols in different food products and their processing by-products. In C. M. Galanakis (Ed.), *Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications* (pp. 135–175). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813572-3.00005-1>

Urfalino-Rodríguez, D. P., & Worlock-Hughes, J. (2016). Evaluación del color en pulpa de tomates deshidratados dulces para la elaboración de confituras1. *Agronomía Mesoamericana*, 27(1), 131–137. <https://www.redalyc.org/journal/437/43743010012/html/>

Valencia-Avilés, E., Ignacio-Figueroa, I., Sosa-Martínez, E., Bartolomé-Camacho, M. C., Martínez-Flores, H. E., & García-Pérez, M.-E. (2017). Polifenoles: propiedades antioxidantes y toxicológicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 16, 15–29. <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1583>

Valenzuela, M. (2018). Caracterización económica de la cadena agroalimentaria del tomate de uso industrial. ODEPA. [https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/02/TomateIndustrial\\_2018.pdf](https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/02/TomateIndustrial_2018.pdf)

Vázquez-Ovando, A., Ovando-Medina, I., Adriano-Anaya, L., Betancur-Ancona, D., & Salvador-Figueroa, M. (2016). Alcaloides y polifenoles del cacao, mecanismos que regulan su biosíntesis y sus implicaciones en el sabor y aroma. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 66(3), 239–254. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0004-06222016000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0004-06222016000300010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Velásquez, V. (2007). Estandarización del Proceso de Secado de Carragenina en la Empresa Extractos Naturales Gelymar S.A. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/fav434e/doc/fav434e.pdf>

Xia, H., Liu, C., Li, C.-C., Fu, M., Takahashi, S., Hu, K.-Q., Aizawa, K., Hiroyuki, S., Wu, G., Zhao, L., & Wang, X.-D. (2018). Dietary Tomato Powder Inhibits High-Fat Diet-Promoted Hepatocellular Carcinoma with Alteration of Gut Microbiota in Mice Lacking Carotenoid Cleavage Enzymes. *Cancer Prevention Research (Philadelphia, Pa.)*, 11(12), 797–810. <https://doi.org/10.1158/1940-6207.CAPR-18-0188>

Xu, B., Sylvain Tiliwa, E., Yan, W., Roknul Azam, S. M., Wei, B., Zhou, C., Ma, H., & Bhandari, B. (2022). Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. *Food Research International*, 152, 110744. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110744>

Zalewska, M., Marcinkowska-Lesiak, M., & Onopiuk, A. (2022). Application of different drying methods and their influence on the physicochemical properties of tomatoes. *European Food Research and Technology*, 248(11), 2727–2735. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04081-0>

## **VII. ANEXOS**

## 7. Anexos

### 7.1 Ajuste de curvas de secado mediante el modelo basado en la segunda ley de Fick

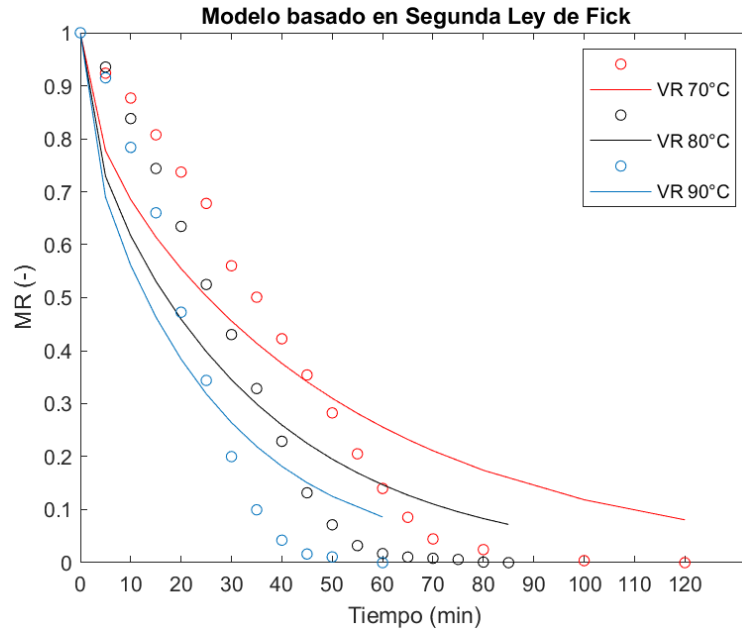


Figura 23. Ajuste del modelo basado en la segunda ley de Fick para el secado en VR a 70, 80 y 90°C.

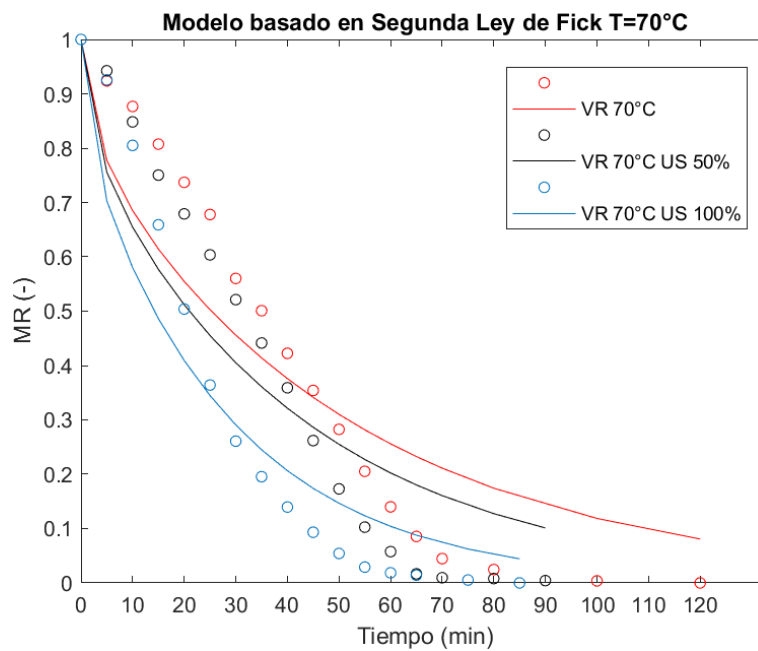


Figura 24. Ajuste del modelo basado en la segunda ley de Fick para el secado a 70°C en VR y VR+US.

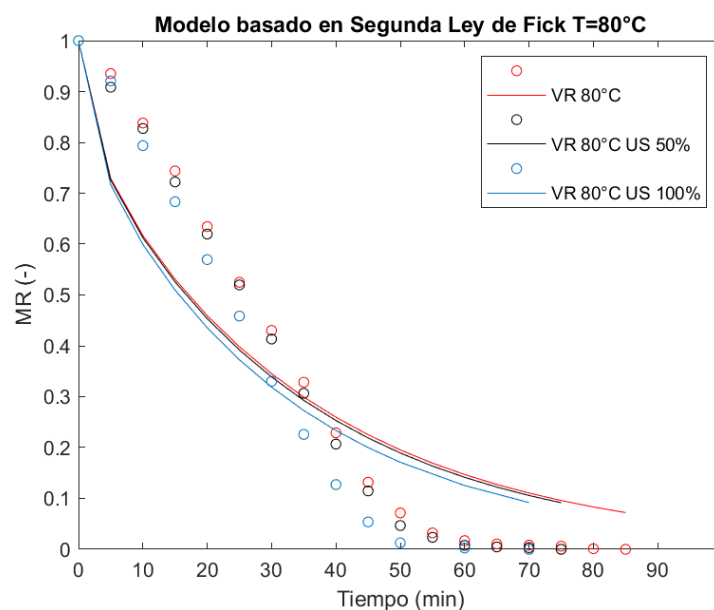


Figura 25. Ajuste del modelo basado en la segunda ley de Fick para el secado a 80°C en VR y VR+US.

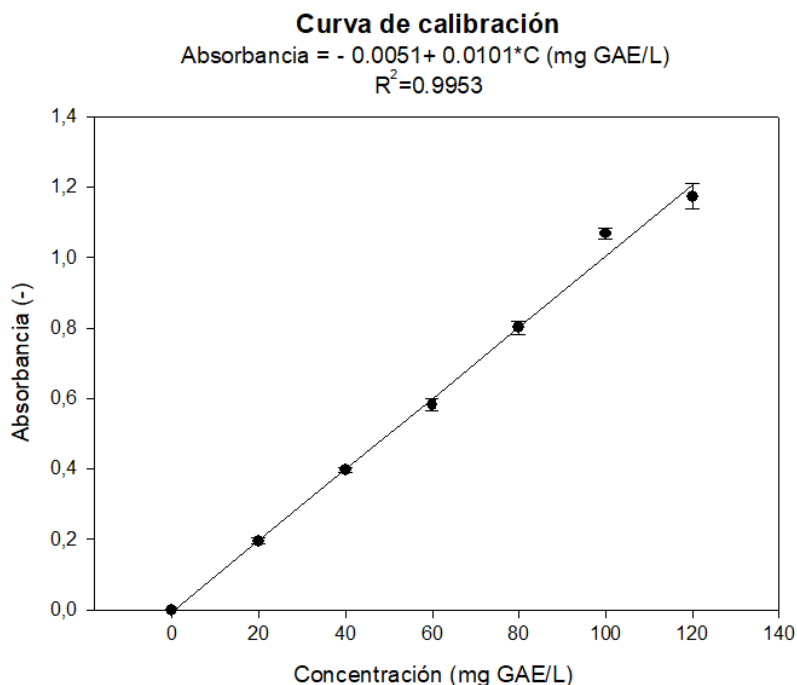
## 7.2 Contenido de polifenoles totales

Tabla 7. Contenido de polifenoles totales (TPC) en las distintas muestras.

Tipo de muestra	TPC (mg GAE/100 g BS)	TPC (mg GAE/100 g BH)
<b>Pulpa</b>	642 ± 69 <sup>a</sup>	34 ± 4 <sup>a</sup>
<b>Liofilizado</b>	256 ± 48 <sup>b</sup>	14 ± 3 <sup>b</sup>
<b>90°C</b>	589 ± 0.3 <sup>a</sup>	31 ± 0.01 <sup>a</sup>
<b>80°C</b>	432 ± 82 <sup>c</sup>	23 ± 4 <sup>c</sup>
<b>80°C 100%</b>	352 ± 81 <sup>bcd</sup>	19 ± 4 <sup>bcd</sup>
<b>80°C 50%</b>	279 ± 11 <sup>b</sup>	15 ± 0.2 <sup>b</sup>
<b>70°C 100%</b>	406 ± 35 <sup>cd</sup>	22 ± 2 <sup>cd</sup>
<b>70°C 50%</b>	304 ± 41 <sup>bd</sup>	16 ± 2 <sup>bd</sup>
<b>70°C</b>	362 ± 0.1 <sup>bcd</sup>	20 ± 0.004 <sup>bcd</sup>

\*Letras minúsculas diferentes en una misma columna representan diferencias significativas (p < 0.05)

### 7.3 Ejemplo de cálculo polifenoles totales (TPC)



**Figura 26.** Curva de calibración ácido gálico.

De la curva de calibración que se observa en la **Figura 26** se obtiene la ecuación de la recta y se despeja C, que corresponde a la concentración de polifenoles presente en la solución (mg GAE/L). Luego, al reemplazar C en la siguiente expresión se conoce la concentración de polifenoles totales de la muestra analizada.

$$TPC \left( \frac{mg \text{ GAE}}{100 g_{BH}} \right) = C \left( \frac{mg \text{ GAE}}{L} \right) \cdot \frac{1}{1000} \left( \frac{L}{mL} \right) \cdot \frac{10}{1} \cdot \frac{V}{m} \left( \frac{mL}{g} \right) \cdot 100$$

Siendo m, la masa de la muestra analizada y V el volumen de metanol 80% usado para la extracción.

## 7.4 Capacidad antioxidante de las muestras

Tabla 8. Actividad antioxidante total (AA) en las distintas muestras.

Tipo de muestra	AA (mg TE/100 g BS)
Pulpa	6643 ± 159 <sup>a</sup>
VR 90°C	2869 ± 2 <sup>b</sup>
VR 80°C	2825 ± 338 <sup>b</sup>
VR 80°C US 100%	2156 ± 67 <sup>d</sup>
VR 80°C US 50%	1777 ± 2 <sup>c</sup>
VR 70°C US 100%	2474 ± 122 <sup>e</sup>
VR 70°C US 50%	1952 ± 106 <sup>cd</sup>
VR 70°C	2482 ± 45 <sup>e</sup>
Liofilizado	1944 ± 23 <sup>cd</sup>

\*Letras minúsculas diferentes en una misma columna representan diferencias significativas (p < 0.05)

## 7.5 Ejemplo de cálculo para la actividad antioxidante (AA)

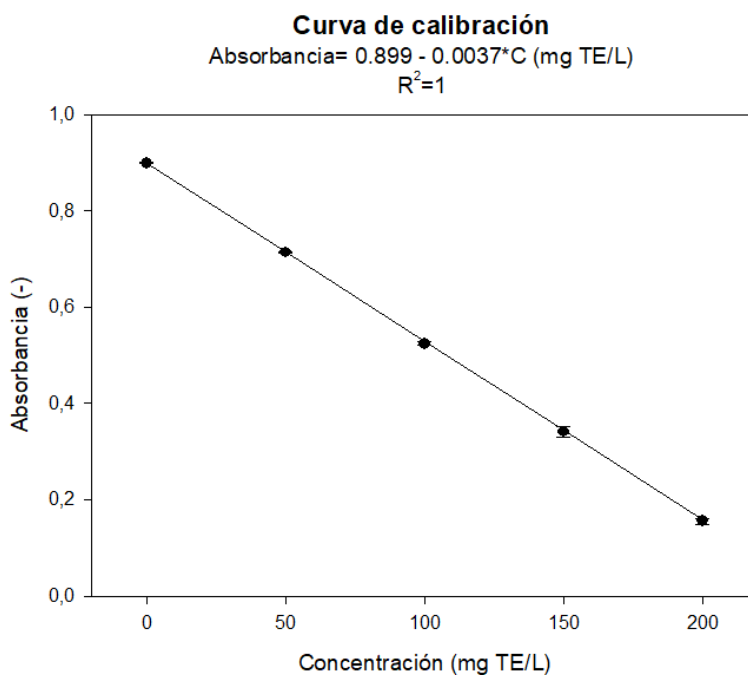


Figura 27. Curva de calibración Trolox.

De la curva de calibración que se observa en la **Figura 27** se obtiene la ecuación de la recta y se despeja C, que corresponde a la actividad antioxidante presente en la solución (mg TE/L). Luego, al reemplazar C en la siguiente expresión se conoce la actividad antioxidante de la muestra analizada.

$$AA \left( \frac{mg TE}{100g_{BH}} \right) = C \left( \frac{mg TE}{L} \right) \cdot \frac{1}{1000} \left( \frac{L}{mL} \right) \cdot \frac{100}{1} \cdot \frac{V}{m} \left( \frac{mL}{g} \right) \cdot 100$$

Siendo m, la masa de la muestra analizada y V el volumen de metanol 80% usado para la extracción.