

ESCUELA DE POSGRADO Y ESTUDIOS CONTINUOS

COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ULTRASONIDO Y FLUJO MARANGONI EN EL PROCESO DE SECADO DE CORAZÓN DE PIÑA Y EL MECANISMO DE INTERACCIÓN DE SU ESTRUCTURA.

Tesis para optar el grado de **MAESTRO** en:

DIRECCIÓN DE OPERACIONES Y CADENA DE ABASTECIMIENTO

Autor:

Saavedra Davila, Juan Ernesto

Asesor:

Doctor. Miano Pasto Alberto Claudio

Trujillo – Perú

2022

Resumen

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la aplicación de tecnologías de ultrasonido y/o etanol antes del secado convectivo en muestras con una estructura vascular particular (núcleo de piña). Los corazones de piña se cortaron paralelamente (Lc) o perpendicularmente (Tc) orientados a haces vasculares (VB). Se evaluaron los efectos sobre la cinética de secado, contracción, cinética de rehidratación, recuperación de tamaño y textura. Como resultados principales, se observó una reducción en el tiempo de secado de hasta un 60 % cuando se aplicó el pretratamiento combinado durante 10 min en las muestras de Tc. En cuanto a la retracción, las muestras Tc conservan mejor su diámetro (>53%), mientras que las muestras Lc conservan mejor su espesor (>73%) después del secado, lo que se explica por la orientación paralela de la VB a cada dimensión. Además, las muestras Tc mostraron una mayor tasa de rehidratación mientras que las muestras Lc mostraron una mayor retención de agua (~12 más). Después de la rehidratación, las muestras recuperaron su espesor y diámetro en más del 70%. Estos resultados contribuyen a explicar mejor la interacción tecnología-proceso-estructura.

Palabras Clave: Ultrasonido, pretratamiento con etanol, deshidratación, efecto Marangoni

Abstract

This study aimed to evaluate the application of ultrasound and/or ethanol technologies prior to convective drying in samples with a particular vascular structure (pineapple core). Pineapple cores were cut parallelly (Lc) or perpendicularly (Tc) oriented to vascular bundles (VB). Effects on drying kinetics, shrinkage, rehydration kinetics, size recovery, and texture were evaluated. As main results, a reduction in drying time up to 60% was observed when the combined pretreatment for 10 min was applied in Tc samples. Regarding shrinkage, the Tc samples better preserve their diameter (>53%), while the Lc samples better preserve their thickness (>73%) after drying, which was explained by the parallel orientation of the VB to each dimension. In addition, Tc samples showed higher rehydration rate while the Lc samples showed greater water retention (~12 more). After rehydration, samples recovered their thickness and diameter in more than 70%. These results contribute to better explain the technology-process-structure interaction.

Keywords: Ultrasound, ethanol pretreatment, dehydration, Marangoni effect

Dedicatoria y Agradecimientos

A mi familia,

la culminación de este trabajo es producto

de su apoyo, esfuerzo, confianza y cariño

para animarme a seguir adelante

A los ingenieros

Alberto Claudio Miano Pastor,

Meliza Lindsay Rojas Silva,

Pedro E.D. Augusto

y Bruna de Oliveira Gomes

por su apoyo, asesoría y paciencia

al brindarme la oportunidad

de trabajar con ustedes en el presente proyecto

A mis maestros de carrera, de maestría

y la Universidad Privada del Norte

por brindar el proceso integral

de mi formación profesional

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

por el apoyo logístico y financiero para el desarrollo del proyecto

A mis amigos, compañeros,

la carrera de Ingeniería Agroindustrial y Dios

Tabla de contenidos

Carátula	i
Resumen	ii
Abstract.....	iii
Dedicatoria y agradecimiento	iv
Tabla de contenidos	v
Índice de tablas y figuras	vi
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Realidad problemática	1
I.2. Pregunta de investigación	2
I.2.1. Pregunta general	2
I.2.2. Preguntas específicas	2
I.3. Objetivos de la investigación.....	2
I.3.1. Objetivo general	2
I.3.2. Objetivos específicos	2
I.4. Justificación de la investigación	2
I.4.1. Justificación Teórica	2
I.4.2. Justificación Práctica	3
I.4.3. Justificación Metodológica	3
I.5. Alcance de la investigación	3
II. MARCO TEÓRICO.....	3
II.1. Antecedentes	3
II.1.1. Antecedentes internacionales.....	3
II.1.2. Antecedentes nacionales	5
II.2. Conceptos.....	6
II.3. Bases Teóricas	6
II.3.1. Secado de Alimentos	6
<i>Modelos Matemáticos y ecuaciones de cinética de secado</i>	<i>9</i>
II.3.2. Tecnología de Ultrasonido	14
II.3.3. Flujo de Marangoni	20
II.4. Marco conceptual (terminología)	22
III. HIPÓTESIS	23

III.1.	Declaración de Hipótesis	23
III.1.1.	Hipótesis general	23
III.1.2.	Hipótesis específicas	23
III.2.	Operacionalización de variables.....	23
IV.	DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS Y ANÁLISIS	25
IV.1.	Tipo de investigación:.....	25
IV.2.	Nivel de investigación:	25
IV.3.	Diseño de investigación:.....	25
IV.4.	Método de investigación:.....	25
IV.5.	Población:.....	25
IV.6.	Muestra:	26
IV.7.	Unidad de estudio:	26
IV.8.	Técnicas de recolección de datos.....	26
IV.8.1.	Técnica:	26
IV.8.2.	Instrumento:.....	26
IV.9.	Presentación de resultados:.....	26
IV.9.1.	Materia Prima:	26
IV.9.2.	Pretratamiento de Secado:	26
IV.9.3.	Secado Convectivo:	27
IV.9.4.	Proceso de Rehidratación:	28
IV.9.5.	Evaluación Estructural:.....	28
IV.9.6.	Encogimiento:	29
IV.9.7.	Análisis Estadístico:	29
V.	RESULTADOS	30
V.1.	Efecto de la estructura, ultrasonido y flujo de Marangoni en los procesos de secado y rehidratación.	30
V.2.	Determinar la influencia de la combinación de tecnologías (ultrasonido y flujo de Marangoni(etanol)) y la orientación del corte en las cinéticas y tiempos de secado y rehidratación	31
V.3.	Determinar el impacto de la combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni(etanol) en la estructura y textura.....	38
VI.	DISCUSIÓN, CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	41
VI.1.	Discusión	41

VI.1.1. Efecto de la estructura, ultrasonido y flujo de Marangoni en los procesos de secado y rehidratación.....	41
VI.1.2. Influencia de la combinación de tecnologías (ultrasonido y flujo de Marangoni (etanol)) y la orientación del corte en las cinéticas y tiempos de secado y rehidratación .	43
VI.1.3. Contracción después de los pretratamientos y después del secado	49
VI.1.4. Impacto de la combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni en la estructura y textura.....	51
<i>Textura (energía de compresión)</i>	<i>51</i>
<i>I.1.1. Encogimiento (contracción de la muestra)</i>	<i>51</i>
VI.2. Conclusiones.....	53
VI.3. Recomendaciones	54
Lista de referencias	55
Apéndice.....	66

Índice de tablas y figuras

Tabla 1	9
Tabla 2	35
Tabla 3	37
Tabla 4	66
Tabla 5	66
Tabla 6	67
Tabla 7	67
Figura 1: Representación conceptual de transferencia de calor y masa durante el secado de alimentos	7
Figura 2: Formación y colapso de burbuja de cavitación.....	17
Figura 3. a) Flujo de Marangoni. La modificación del medio mediante la adición de un surfactante (alcohol) (b) genera fuerzas que impulsan movimiento desde zonas de baja tensión superficial a zonas de alta tensión superficial (c).....	21
Figura 4. Análisis de Componentes Principales (ACP) que asocian los pretratamientos realizados en cuanto a su efecto sobre las variables dependientes	30
Figura 5. Cinética de secado convectivo del corazón de piña con diferentes tratamientos (Control, Etanol-5 min (E5), Etanol-10 min (E10), Etanol+Ultrasonido 5 min (E+US5), Etanol+Ultrasonido 10 min (E+ US10) (a) Comparación entre testigos con corte longitudinal (Lc) y transversal (Tc), (b) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Lc y (c) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Tc.	32
Figura 6. Cinética de rehidratación del corazón de piña en comparación con <i>in natura</i> . (a) comparación entre testigos con corte longitudinal (Lc) y transversal (Tc), (b) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Tc y (c) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Lc.	35
Figura 7. Tiempo requerido para los diferentes tratamientos (Control, Etanol-5 min, Etanol-10 min, Etanol+Ultrasonido 5 min, Etanol+Ultrasonido 10 min) de tiempo de secado para alcanzar un contenido de humedad del 25% (wb) con corte longitudinal y transversal.	36
Figura 8. Evaluación de textura de muestras control y pretratadas en corte longitudinal y transversal.....	38
Figura 9. Porcentaje de tamaño de diámetro y espesor entre muestras control y pretratadas en corte longitudinal y transversal.....	39
Figura 10. Tamaño de muestra hidratada, porcentaje de diámetro y espesor de muestras control y pretratadas en corte longitudinal y transversal.....	40

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Realidad problemática

Comprender la relación entre la microestructura de los alimentos y la forma en que se comportan los alimentos durante el procesamiento es muy importante para diseñar un sistema de procesamiento de alimentos eficiente (Karim et al., 2018). En el secado, el cambio microestructural es uno de los más importantes, ya que está estrechamente relacionado con la calidad (por ejemplo, la densidad, la capacidad de rehidratación y reconstitución, así como con la textura) y la estabilidad de almacenamiento de los productos alimenticios secos (Ngamwonglumlert & Devahastin, 2018). Los cambios de estructura y su importancia de cada materia vegetal conllevan a resultados diferentes que dependen del tipo de corte, tamaño y estructura procesada. En un estudio en secado microondas al vacío, rodajas (corte vertical) de jengibre mostraron una mayor tasa de contracción y un valor de dureza más alto, con una estructura más porosa de la capa superficial mientras que tajadas (corte horizontal) de jengibre tuvieron tasas de rehidratación más altas en los primeros 15 minutos de la rehidratación (Lin et al., 2020). En yuca elefante se encontró que difusión ocurrirá más en la dirección axial que en la dirección radial, debido a que el área de la sección transversal axial es mucho mayor que el área de la sección transversal radial (Kosasih et al., 2020). Respecto al rendimiento, en jengibre seco, el corte longitudinal redujo significativamente el tiempo de secado (15.12-29.6%) en comparación con el corte transversal; y mejoró las propiedades físicas (grado de contracción, dureza, tasa de rehidratación) del jengibre deshidratado (Ren et al., 2021). La utilización de nuevas tecnologías aplicadas como el ultrasonido en combinación con el etanol ha presentado resultados positivos para reducir los tiempos, consumo de energía, preservar el contenido nutricional y calidad (Amanor-Atiemoh et al., 2020; Feng et al., 2019; Rojas & Augusto, 2018a; M. L. Rojas et al., 2020; K. C. Santos et al., 2020). Sin embargo, son pocas las investigaciones realizadas en secado o aplicadas en tecnologías emergentes en estudio de la relación entre estructura y proceso, por lo tanto, su estudio permitiría entender mejor el mecanismo de acción e impacto de la anisotropía en el secado de piña.

I.2. Pregunta de investigación

I.2.1. Pregunta general

¿La combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni (aplicación de etanol) y la orientación del corte acelerará la cinética de secado y rehidratación de la piña?

I.2.2. Preguntas específicas

- ❖ ¿Qué influencia presenta la combinación de tecnologías (ultrasonido y flujo de Marangoni (aplicación de etanol)) y la orientación del corte en las cinéticas y tiempos de secado y rehidratación?
- ❖ ¿Qué impacto tendrá la combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni en la estructura y textura?

I.3. Objetivos de la investigación

I.3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la estructura, ultrasonido y flujo de Marangoni (aplicación de etanol) en los procesos de secado y rehidratación

I.3.2. Objetivos específicos

- ❖ Determinar la influencia de la combinación de tecnologías (ultrasonido y flujo de Marangoni (aplicación de etanol)) y la orientación del corte en las cinéticas y tiempos de secado y rehidratación
- ❖ Determinar el impacto de la combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni (aplicación de etanol) en la estructura y textura

I.4. Justificación de la investigación

I.4.1. Justificación Teórica

El presente proyecto se justifica en la escasa investigación relacionada al estudio de sustancias promotoras del flujo de Marangoni en alimentos, siendo más incipiente en su combinación con tecnologías no convencionales como el ultrasonido, existiendo solo pocos estudios relacionados hasta la fecha. La evolución y desarrollo del proyecto ampliará y generará nuevos conocimientos, tanto en su influencia en la transferencia de materia durante el secado como de un alimento como su efecto en su estructura y composición, que puede reafirmar la combinación del flujo de Marangoni con ultrasonido como pretratamientos en el secado.

I.4.2. Justificación Práctica

La presente investigación busca mejorar el proceso de secado de alimentos, desde que existe la necesidad de lograr la reducción de tiempos de secado, disminuir el consumo energético y los costos de procesamiento. Además, producir alimentos con larga vida útil que mantengan los aspectos de calidad físico-química y nutricional del alimento similar al producto original.

I.4.3. Justificación Metodológica

La presente investigación plantea evaluación del proceso de secado de alimentos aportando un diseño de evaluación combinado del ultrasonido con el flujo Marangoni en la interacción de la estructura del alimento con nuevas tecnologías. Esto servirá de guía a otros investigadores tanto en proceso aplicado a otras materias primas como información y recomendaciones detectadas en las conclusiones

I.5. Alcance de la investigación

El alcance de la presente investigación es exploratorio. Los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que tan sólo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas (Hernández-Sampieri et al., 2017). Por lo tanto, la presente investigación es exploratoria porque está enfocada a la exploración de un tema poco estudiado en el ámbito del secado de alimentos con la utilización de tecnologías novedosas que ayudará a profundizar en su aplicación industrial.

II. MARCO TEÓRICO

II.1. Antecedentes

II.1.1. Antecedentes internacionales

“Mejora del proceso de secado catalítico por infrarrojos y características cualitativas de las rodajas de ajo deshidratado pretratamiento con alcohol asistida por ultrasonido”(Feng et al., 2019). En este trabajo se investigaron los efectos de diferentes tratamientos previos en el proceso de secado y las características de calidad de catalítico infrarrojo (CIR) secó rebanadas de ajo. Se prepararon diferentes muestras de ajo, incluyendo un control (no-pretratada), y las muestras tratadas previamente con alcohol, alcohol-ultrasonido (US + Alcohol) y agua-ultrasonido (US + agua). Se estudió

el efecto de diferentes tratamientos previos sobre la microestructura de ajo. Todos los pretratamientos disminuyeron el tiempo de secado por 9.09%-27.27% en comparación con el control, mientras que US + Alcohol proporciona la mayor reducción (27.27%). Se propuso el posible mecanismo de mejora en el proceso de deshidratación de las muestras de ajo. A excepción del contenido de alicina, las características de calidad de la contracción, rugosidad de la superficie, el sabor, el color y el contenido microbiano de muestra de ajo pretratadas con alcohol+US eran predominantemente mejor que el control o muestras pretratada con alcohol o US + agua. Esta investigación ofrece una nueva tecnología de pretratamiento, para dar lugar a una alta calidad CIR seca ajo productos de manera eficiente.

“Mejora del secado por convección de la zanahoria mediante la combinación de etanol y ultrasonido como pretratamientos: efecto sobre la estructura del producto, la calidad, el consumo de energía, la cinética de secado y rehidratación” (K. C. Santos et al., 2020). En este proyecto, el ultrasonido se combinó con etanol para mejorar diferentes aspectos de secado convectivo zanahoria, evaluando tanto la calidad de procesamiento y el producto. La ecografía en el tratamiento del agua como resultado de la inflamación celular y pequeño impacto en la textura. En otras palabras, el ultrasonido en etanol y tratamientos con etanol modifica tanto la microestructura (modificaciones de la pared celular de tejido parenquimático) y macroestructura (contracción y resistencia a la perforación) de la zanahoria. Pretratamientos con ultrasonidos en etanol y etanol mejoraron la cinética de secado, lo que reduce el tiempo de procesamiento (~50%) y el consumo de energía (42-62%). Estos pretratamientos también mejoran la rehidratación, cuya tasa y la retención inicial de agua fueron mayores que el control. Además, el contenido de carotenoides se conservó después del secado, para todos los tratamientos. No se observó ningún impacto en la contracción. Una discusión mecanicista, basado en modificación estructural (microestructura y la macroestructura) y las propiedades físicas del agua y etanol, se proporcionó. Como conclusión, este trabajo no sólo describe los aspectos positivos de la combinación de las tecnologías de ultrasonido y etanol como pretratamientos a secado por convección, pero también propuso mecanismos para explicar los fenómenos.

“Pretratamientos con ultrasonido y etanol para mejorar el secado por convección: Secado, rehidratación y contenido de carotenoides de la calabaza”(M. L. Rojas et al., 2020). Entre los diferentes efectos, las tecnologías de ultrasonido y etanol cambian la

estructura del producto y promueven la transferencia de masa cuando se utilizan como pretratamientos para mejorar el secado de los alimentos. Por primera vez, se evaluó su aplicación combinada como pretratamiento para mejorar el secado convectivo, así como las propiedades del alimento seco. Como alimento modelo se utilizaron cilindros de calabaza, que se secaron con aire a 50°C y 0.8 ± 0.1 ms⁻¹. Se estudiaron los efectos sobre la cinética de secado y rehidratación, así como sobre el consumo energético y la conservación de carotenoides. En comparación con el control, todos los pretratamientos disminuyeron el tiempo de secado en más del 48%. La combinación de etanol y ultrasonidos presentó la mayor reducción tanto en el tiempo de secado (59%) como en el consumo de energía (44%). Los pretratamientos también mejoraron las propiedades de rehidratación en más de un 28%: se logró una mayor tasa de rehidratación y un aumento de la retención de agua. Se discutieron los posibles mecanismos que involucran la modificación de la estructura y la transferencia de masa durante el proceso de pretratamiento y secado. Además, la extracción de carotenoides debido a los pretratamientos fue insignificante en comparación con el notable efecto de evitar la degradación de este nutriente durante el secado. Las muestras pretratadas conservaron ~100% del contenido de carotenoides, mientras que las muestras control presentaron degradación parcial (23%). Esto se explica por los efectos negativos evidenciados por el historial térmico de la muestra durante el secado. Los resultados abren nuevas perspectivas sobre un método innovador para mejorar el proceso de secado y la calidad del producto mediante la combinación de etanol y ultrasonido.

II.1.2. Antecedentes nacionales

Bajo la investigación “**Acelerando la deshidratación de Arándanos (*Vaccinium corymbosum*) empleando el efecto de Marangoni**” (Aguirre & Miano) se tuvo como objetivo fue evaluar el efecto de la concentración de etanol y tiempo de pretratamientos sobre la velocidad de secado en arándanos (*Vaccinium corymbosum*). Para el desarrollo de esta investigación se cortaron los arándanos longitudinalmente por la mitad para luego sumergirlos por 2, 5 y 10 min en etanol con concentraciones de 50, 70 y 96% V/V. Luego las muestras fueron secadas por aire en una estufa a 60°C, registrando la masa para la construcción de las cinéticas de secado. Se usó el modelo de Page para el modelamiento matemático de las cinéticas y se compararon sus parámetros entre los tratamientos realizados para verificar si hubo diferencia significativa. Como resultado se obtuvo la mejora del proceso de secado debido al pretratamiento, siendo el

pretratamiento con etanol 96% V/V y tiempo de 5 y 10 min los que ocasionaron una reducción significativa del tiempo de secado.

II.2. Conceptos

1. **Aplicación del Ultrasonido:** Aplicación de ondas acústicas de 40 kHz en un tiempo determinado
2. **Aplicación de etanol:** Pretratamiento mediante inmersión de la muestra en etanol
3. **Orientación de corte:** Tipo de corte con referencia al tejido vascular de la muestra.
4. **Encogimiento:** Fenómeno físico común del producto seco a consecuencia de la reducción de su volumen externo.
5. **Parámetros cinéticos de rehidratación:** Parámetros del modelo matemático de rehidratación
6. **Parámetros cinéticos de secado:** Parámetros del modelo matemático del secado

II.3. Bases Teóricas

II.3.1. Secado de Alimentos

El secado es un proceso de transferencia de calor y masa para eliminar el agua u otro disolvente por evaporación, en la mayoría de los casos, de un sólido, semisólido o líquido, así como una de las formas más rentables para la conservación de alimentos de todas las variedades (Jangam et al., 2010; Varzakas & Tzia, 2014). Esta operación unitaria es uno de los métodos más antiguos de conservación, utilizado por su versatilidad y extensión en la industria alimentaria, con continuo interés en la investigación en la actualidad (Ratti, 2008). Con el secado se buscan nuevas vías y posibilidades de agregar valor a diversos productos de corta vida útil mediante procesos de secado a escala global como medio eficaz para garantizar un correcto suministro alimenticio (Sabarez, 2020).

Como técnica de conservación, el secado elimina agua del alimento a un nivel donde inhibe o minimiza el crecimiento microbiano, reacciones enzimáticas y otras reacciones adversas de deterioro (Law et al., 2014; Mujumdar, 2006; SMITH, 2003; Varzakas & Tzia, 2014), reduce la masa y el volumen del producto en cantidades significativas y mejora la eficiencia del transporte y almacenamiento del producto (Corrêa et al., 2017; Niu et al., 2019; Singh & Heldman, 2001), agrega valor a los productos alimenticios debido a algunas características especiales que solo están presentes o se manifiestan en forma seca, como sabor, textura, color, valor medicinal, etc. (Law et al., 2014; Sinha et al., 2010) y minimiza o elimina el desperdicio de alimentos (Law et al., 2014; Masud et al.; Mujumdar, 2006; Ratti, 2008; Varzakas & Tzia, 2014).

El comportamiento de secado de los materiales alimenticios depende de la composición y el contenido de humedad del material alimenticio que se va a secar, su espesor y geometría, caudal de aire y humedad relativa. (Sinha et al., 2010). Durante el secado, se presentan dos mecanismos de transporte simultáneos en el secado: (1) La transferencia de calor desde el medio de secado al material alimenticio, que induce cambios de fase del agua de sólido o líquido a una fase de vapor a través de la estructura del producto, y (2) el transporte de agua (líquida o de vapor) migra desde el interior del producto (células internas) a la superficie a través de una estructura porosa a la superficie de los alimentos y luego al ambiente circundante por un gas portador (Sabarez, 2020; Sansiribhan et al., 2010; Sinha et al., 2010).

En el caso de secar materias alimenticias bajo la influencia de un fluido (generalmente aire o gas inerte), los principales mecanismos de secado son la difusión superficial o difusión de líquido en las superficies de los poros, difusión de líquido o vapor debido a diferencias de concentración de humedad y la acción capilar en alimentos granulares y porosos debido a fuerzas superficiales, siendo importantes los tres mecanismos por los que se transfiere el calor como conducción, convección y radiación (Figura 1) (HT Sabarez, 2016; Henry Sabarez, 2016; Sabarez, 2020; Sinha et al., 2010; Varzakas & Tzia, 2014).

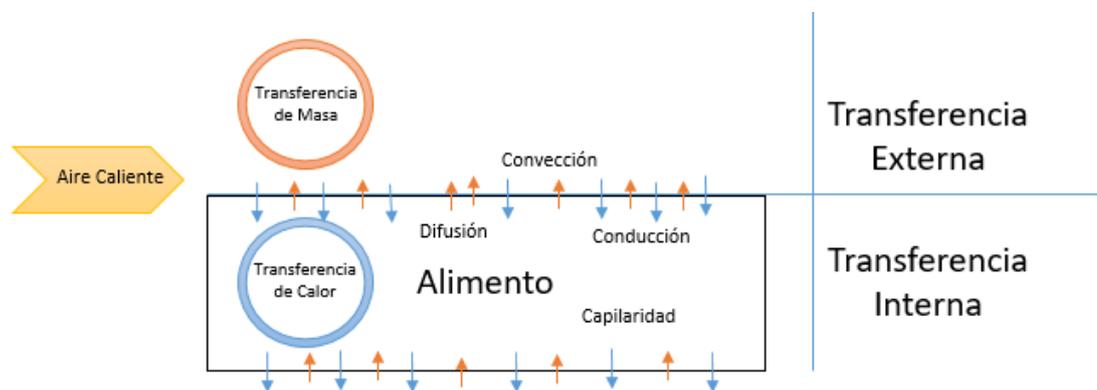


Figura 1: Representación conceptual de transferencia de calor y masa durante el secado de alimentos

Al ser el secado un proceso gobernado por fenómenos de transferencia de calor, masa y momento simultáneos y a menudo acoplados y multifásicos, sumado a la estructura diversa de los materiales alimentarios, la predicción de la cinética de secado no llega a ser precisa (Varzakas & Tzia, 2014). Razón por la cual, se han desarrollado ecuaciones de secado en capa fina, modelos teóricos derivados en su mayoría en leyes de difusión de Fick junto con las ecuaciones derivadas resueltas por Crank (1979) para placa plana, cilindro y esfera.

La segunda ley de difusión de Fick se usa comúnmente para describir el movimiento de la humedad durante el secado de la siguiente manera (Varzakas & Tzia, 2014):

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (1)$$

Esta ecuación describe la difusión del componente alimenticio con una masa de producto, donde D_{eff} es difusividad de masa, “x” es la concentración del componente que se difunde dentro de la estructura del alimento sólido y “t” es tiempo (Singh & Heldman, 2001).

La ecuación anterior se basa en algunas suposiciones como: (i) existe una transferencia de masa simétrica con respecto al centro, (ii) el coeficiente de difusión es independiente del contenido de humedad local y (iii) la contracción del volumen es insignificante (Sinha et al., 2010).

Suponiendo un coeficiente de difusión constante, la ecuación de Fick con difusión unidimensional para diferentes geometrías (placa, cilindro y esfera) se puede dar como (Rizvi, 1986):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2)$$

donde “r” es constante y depende de la forma: 0 para geometrías planas, 1 para cilíndricas y 2 para geometrías esféricas. Las condiciones iniciales y de contorno son:

$$M(r, 0) = M_i, \quad \text{siendo } t = 0$$

$$M(0, t) = M_\infty, \quad \text{siendo } r = r_0 \text{ (en la superficie)}$$

$$M(0, t) = \text{finito}, \quad \text{siendo } r = 0 \text{ (en el centro)}$$

Sobre la base de supuestos de una distribución de humedad inicial uniforme, resistencia externa insignificante, gradientes de temperatura insignificantes y contracción insignificante durante el secado, las soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión para geometrías simples se dan en forma de series infinitas:

Para placa infinita:

$$M^* = \frac{M - M_\infty}{M_i - M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} D_{eff} t \right] \quad (3)$$

Para cilindro infinito:

$$M^* = \frac{M - M_\infty}{M_i - M_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \alpha_n^2} \exp(-D_{eff} \alpha_n^2 t) \cdot J_0(r \alpha_n) = 0 \quad (4)$$

Para esfera:

$$M^* = \frac{M - M_\infty}{M_i - M_\infty} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-\frac{n^2 \pi^2}{r^2} D_{eff} t \right] \quad (5)$$

Donde M^* representa el contenido de humedad no alcanzado; $J_0(x)$ en la ecuación para ciclo infinito es la función de Bessel de primer tipo y orden cero; y α_n son las raíces de esta función (Srikiatden & Roberts, 2007).

Adicional a ello, se encuentran ecuaciones empíricas o semiempíricas, para describir curvas de secado (Tabla 1) (López-Mejía et al., 2019).

Tabla 1.

Modelos Matemáticos y ecuaciones de cinética de secado

Ecuación	Modelo	Referencia
$MR = \exp(-kt)$	Lewis/Newton	(Szadzińska et al., 2019)
$MR = \exp(-kt^n)$	Page	(Page, 1949; N. C. Santos et al., 2020) R
$MR = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t}$	Peleg	(Peleg, 1988)
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson & Pabis	(Mghazli et al., 2017)
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarítmica	(Yagcioglu, 1999)
$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Dos Términos	(Henderson, 1974)

$MR = a \exp(-k_0)$ $+ (1$ $- a) \exp(-k_1 t)$	Dos exponenciales	Términos (Sharaf-Eldeen et al., 1980)
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang & Singh	(Behera & Sutar, 2018)
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al.	(Midilli et al., 2002)
$MR = \frac{c}{(1 + a \exp(bt))}$	Logística	(Chayjan et al., 2017)
$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Demir et al.	(Kaveh et al., 2018)

En particular, el modelo de Page (1949) se presenta como el modelo que mejor describe la pérdida de humedad vs tiempo, representado mediante la ecuación:

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \exp(-kt^n) \quad (6)$$

Donde " M_∞ " es la humedad de equilibrio, " M_0 " humedad inicial y " t " magnitud de tiempo y " k " la constante de secado (Chen & Mujumdar, 2009).

El modelo de Page es un modelo semiteórico que deriva del modelo teórico (segunda ley de difusión de Fick) o de su variación simplificada (ley de enfriamiento de Newton) (Onwude et al., 2016). Al agregar una constante empírica adimensional (n) al término de tiempo, lograr moderarlo y mejorar los resultados para la predicción de la pérdida de humedad (Doymaz & İsmail, 2011; Ertekin & Firat, 2017; Kahveci & Cihan, 2008). Sin embargo, si bien los parámetros en el modelo de Page pueden correlacionarse con el material y las condiciones de secado, no representan directamente las propiedades de los materiales o los parámetros fenomenológicos (Simpson et al., 2013).

Page determina que la integración de Sheerwood (1931) de la ecuación 6 de la Ley de Fick se representa mediante la ecuación:

$$\ln \frac{(M_t - M_\infty)}{(M_0 - M_\infty)} = kt \quad (7)$$

Donde tomando el exponencial de ambos lados se obtiene (Simpson et al., 2017):

$$\frac{(M_t - M_\infty)}{(M_0 - M_\infty)} = \exp(-kt) \quad (8)$$

La ecuación para una placa es la suma de términos infinitos, según Sheerwood (1931), se expresa:

$$\frac{(M_t - M_\infty)}{(M_0 - M_\infty)} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-\frac{\pi^2 kt}{L^2}} + \frac{1}{9} e^{-9\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{kt}{L^2}} \dots \right] \quad (9)$$

Que puede ser simplificada asumiendo un tiempo de secado largo (número de Fourier > 0.6), evaluando solo el primer término de la suma (Simpson et al., 2017), convirtiéndose:

$$\frac{(M_t - M_\infty)}{(M_0 - M_\infty)} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-\frac{\pi^2 kt}{L^2}} \right] \quad (10)$$

Donde, si se asume que $k_1 = \frac{8}{\pi^2}$ y $k_2 = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{K}{L^2}$ entonces se convierte en:

$$\frac{(M_t - M_\infty)}{(M_0 - M_\infty)} = k_1 \exp(-k_2 t) \quad (11)$$

Que representa una solución general para diferentes geometrías como placa infinita, esfera o paralelepípedo para un tiempo de secado prolongado (Simpson et al., 2017).

El uso de derivadas de tiempo fraccionario ha sido corroborado por estudios que indican que los materiales porosos están bien caracterizados con respecto a los comportamientos tanto superdifusivos como subdifusivos utilizando solo órdenes fraccionarios temporales. Por lo tanto, la solución para la difusión anómala de la ecuación 1 es:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} E_\alpha \left\{ -D_{eff} \left[\frac{(2i-1)\pi}{2L} \right]^2 t^\alpha \right\} \quad (12)$$

Considerando largos tiempos de secado, como se consideró en la Ec. 9 (es decir, $Fo > 0,6$), Ec. 12 se puede simplificar a:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} E_\alpha \left[-D_{eff} \left(\frac{\pi}{2L} \right)^2 t^\alpha \right] \quad (13)$$

Como α tiende a 1, la función de Mittag-Leffler converge a una función exponencial. Esta convergencia transforma el modelo de ecuación

fraccionaria (Ec. 13) en un modelo de segunda ley de Fick, como lo desarrolló Crank (1979), que es consistente con el hecho de que si el factor fraccionario α es uno, la ecuación fundamental de difusión anómala se convierte en la ecuación fundamental de la segunda ley de difusión de Fick. Por lo tanto, cuando se cumplen las condiciones de tiempo de secado prolongado, la relación de humedad para la difusión anómala se puede mostrar como la ecuación 14 (Giraldo-Zuniga et al., 2010; Simpson et al., 2013):

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left[-D_{eff} \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 t^\alpha\right]} \quad (134)$$

Por lo tanto, si $\alpha = 1$, la ecuación 14 converge a la ecuación 10.

Una versión generalizada de la ecuación 11 (geometrías más allá de la placa infinita) se puede expresar de la siguiente manera:

$$MR_t = k_1 e^{(-k_2 t^\alpha)} \quad (145)$$

Los modelos presentados para evaluar las cinéticas de secado se utilizan para describir el proceso empleando diferentes técnicas de secado. Al respecto, Bennamoun & Li (2018) los divide en convectivo, conductivo (Karapantsios, 2006) y radioactivo.

En los métodos de secado convectivo se encuentran por aire caliente (Lewicki, 2006), vapor sobrecalentado (Van Deventer & Heijmans, 2001), bomba de calor (Colak & Hepbasli, 2009), liofilización (Tang et al., 2005). Por otro lado, el secado solar (Belessiotis & Delyannis, 2011), microondas (Soysal, 2004), infrarrojo (Nowak & Lewicki, 2004), ultrasonido (Musielak et al., 2016) son tipos de secado radioactivo.

Se encuentran muchas más clasificaciones de métodos diferentes, cada uno con sus propias ventajas y desventajas para aplicaciones particulares (Sabarez, 2020; Varzakas & Tzia, 2014). Su fin común busca preservar o elevar los aspectos de calidad del alimento como física (color, encogimiento, porosidad, rehidratación), química, microbiológica y nutricional (Hasan Masud et al., 2020; Law et al., 2014) además de energía, tiempo, costo y seguridad (Masud et al.; Menon et al., 2020; Ratti, 2008).

En la actualidad, se busca aprovechar potenciales tecnologías en el procesamiento de alimentos, buscando controlar un sistema de proceso-estructura-función complejo (Yanniotis et al., 2013). Siguiendo esto surgen nuevas técnicas de secado desde la perspectiva de investigación que logren un impacto positivo en la industria alimentaria, buscando mejor calidad del

producto, capacidad aumentada, menor tiempo de secado, seguridad operativa, beneficios de secado híbrido, mejor control de procesos, mejores costos económicos o no contaminantes por nombrar algunos (Moses et al., 2014; Sabarez, 2020; Sagar & Kumar, 2010). Las utilizations de estos nuevos métodos incluyen su aplicación asistida, como pretratamiento o conjunta:

El ultrasonido, mediante la transmisión acústica, afecta el grosor de la capa límite entre el líquido agitado y el sólido. La cavitación generada, consiste en la formación de burbujas en el líquido que pueden colapsar y generar fluctuaciones de presión localizadas. Esto aumenta la transferencia de masa de tratamiento osmóticos (da Rosa et al., 2019; Sagar & Kumar, 2010; Yanniotis et al., 2013; Zhu et al., 2018). La alta presión hidrostática daña la estructura de la pared celular, que conduce a cambios significativos en la arquitectura del tejido, dejando las células más permeables, resultando en aumento de transferencia de masa, al tiempo que inactiva microorganismos y enzimas. (Rastogi et al., 2008; Rastogi & Knorr, 2013; Sagar & Kumar, 2010; Yanniotis et al., 2013). El campo eléctrico pulsante aumenta la permeabilidad de células vegetales, el daño celular inducido por el tratamiento resulta en el ablandamiento del tejido, pérdida de presión de turgencia y reducción de la resistencia por compresión (Loginova et al., 2011; Moses et al., 2014; Parniakov et al., 2014; Sagar & Kumar, 2010; Yanniotis et al., 2013). La deshidratación osmótica conduce a procesos de deshidratación parcial, que no elimina suficiente humedad para ser considerado un producto seco, pero requiere poca energía, funcionando bien como pretratamiento a otros métodos (Fernandes, Gallão, et al., 2008; Sagar & Kumar, 2010; Torringa et al., 2001).

Aunque el proceso es principalmente de naturaleza física, puede resultar en cambios físicos y bioquímicos deseables e indeseables (Sinha et al., 2010). Los efectos térmicos conllevan al pardeamiento enzimático y no enzimático, desnaturalización de proteínas, destrucción térmica de vitaminas y pigmentos, además de pérdida de solutos ligados al agua, por lo que la distribución de componentes en el producto seco puede ser diferente al material de partida (Berk, 2018; Hasan Masud et al., 2020).

Los cambios físicos comunes que se observan en los materiales alimenticios secos son la contracción, la cristalización esponjosa, la aglomeración y el cambio en la temperatura de transición vítrea. (Sinha et al., 2010). El efecto más evidente y difícil de evitar es la contracción. Esto se debe a que el agua dentro de las células se mueve durante el secado, lo que provoca que las células se derriben y colapsen, resultando en una disminución en la dimensión celular y una estructura menos ordenada ocupada por paredes celulares y espacios intercelulares (Sansiribhan et al., 2010). En los

alimentos que consisten en geles hidrófilos blandos y flexibles que no contienen rellenos rígidos, la disminución de volumen corresponde aproximadamente al volumen del agua eliminada y la contracción es isotropa. Por tanto, la forma de la partícula no se ve afectada (Berk, 2018) y se puede obtener una relación paramétrica que relacione la contracción de volumen con el contenido de humedad del material (Jangam et al., 2010). Sin embargo, en la mayoría de casos esto no puede ser considerado ya que los productos presentan diferentes estructuras en su matriz que hace que tengan un comportamiento no isotrópico (Rojas & Augusto, 2018c).

Algunos productos deshidratados pueden ser "reconstituidos" mediante rehidratación (por ejemplo, leche en polvo, puré de patatas, la mayoría de los vegetales secos) (Lewicki, 1998). Idealmente, los alimentos deshidratados deberían poder recuperar su contenido de humedad, volumen, forma y calidad originales al rehidratarse, pero en práctica la mayoría de cambios en el secado son irreversibles y la rehidratación no puede considerarse simplemente como un proceso inverso a la deshidratación (Chen & Mujumdar, 2009), existiendo factores en los procesos, materia prima y parámetros que influyen directamente en el secado que pueden determinar la efectividad de la rehidratación.

La rehidratación de los alimentos secos implica una secuencia de eventos: humectación de la superficie, penetración del agua en los poros, adsorción en la superficie de la matriz, difusión en la matriz sólida y equilibrio. Simultáneamente con la penetración del agua, puede haber una lixiviación de componentes solubles de la partícula de alimento (Chen & Mujumdar, 2009; Ratti, 2008).

La alta porosidad parece ser uno de los requisitos más importantes para una rehidratación completa y rápida (Marabi et al., 2004; Yan et al., 2008). La porosidad, los capilares y las cavidades cercanas a la superficie mejoran el proceso de rehidratación, mientras que la presencia de burbujas de aire atrapadas constituye un obstáculo importante para la invasión de líquido. Hasta que las cavidades se llenan de aire, el agua penetra en el material a través de su fase sólida (Lewicki, 1998). El factor limitante de la velocidad es la adsorción y el transporte interno del agua. En consecuencia, la agitación tiene solo un efecto leve sobre la cinética de rehidratación, excepto si el medio de rehidratación es muy viscoso (Marabi & Saguy, 2004).

II.3.2. Tecnología de Ultrasonido

El ultrasonido (US) se define como la energía emitida por ondas sonoras con frecuencias desde 18 kHz hasta el rango de gigahercios (Yanniotis et al., 2013). La generación de ultrasonidos se basa en transductores que transforman la energía eléctrica en vibraciones mecánicas de alta

frecuencia. En la mayoría de los sistemas industriales se utiliza un generador para convertir la electricidad de la red en una corriente alterna de alta frecuencia, que luego se convierte en vibraciones ultrasónicas de alta frecuencia mediante un material piezoeléctrico, que se transmite a través de cualquier sólido, líquido o gas que posea propiedades elásticas (en sólidos) o acústicas (en fluidos) (Sabarez, 2020; Tsotsas & Mujumdar, 2007).

Las ondas sonoras longitudinales pueden transmitirse a gases, fluidos o alimentos, provocando compresiones cíclicas y rarefacciones del material respectivo. El ultrasonido de alta intensidad y baja frecuencia (16-100 kHz) pueden provocar cavitación, la creación, crecimiento e implosión violenta de burbujas de gas (Patist & Bates, 2008). El colapso de la burbuja se acompaña de picos de alta presión y temperatura (hasta 100 MPa y 5000 K), así como un intenso cizallamiento local (Clark, 2008). Estos tratamientos de ultrasonido de alta potencia tienen el potencial de mejorar una amplia gama de procesos clave en la producción de alimentos (Yanniotis et al., 2013).

La potencia es la energía total irradiada por un sistema ultrasónico por unidad de tiempo ($J.s^{-1}$ o W). El incremento de la potencia determina los efectos conseguidos con el ultrasonido, por lo que es conveniente relacionar la energía ultrasónica en forma relativa al sistema (Tsotsas & Mujumdar, 2007). Así, la intensidad ultrasónica se define por la potencia aplicada por unidad de área tratada ($W.m^{-2}$). La intensidad ultrasónica, I , está relacionada con la presión acústica, PA , por la relación (Mason & Lorimer, 2002)

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho v} \quad (15)$$

donde ρ es la densidad del medio y v la velocidad de la onda.

La frecuencia, f , es el número de ciclos completados por una onda por unidad de tiempo. Está inversamente relacionado con la longitud de onda, λ , que es la distancia entre dos puntos que vibran por igual:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (16)$$

La frecuencia está relacionada con la alternancia de compresiones y expansiones producidas por ultrasonidos en un sólido. Además, la relación entre la longitud de onda y el tamaño de los poros del material define su interacción: si la longitud de onda es mayor que el diámetro de un poro, no se verá afectado internamente por la energía ultrasónica, y si está en el rango del tamaño de los poros, producirá vibraciones internas (Tsotsas & Mujumdar, 2007).

Otra característica importante de la onda, es la atenuación que sufre, durante la propagación a través de un medio. La intensidad de la onda disminuye a medida que aumenta la distancia a la superficie del emisor:

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (17)$$

Aquí, “ I_0 ” es la intensidad emitida, “ d ” es la distancia a la superficie del emisor y “ α ” es el coeficiente de atenuación (absorción) que es una propiedad característica del medio. La atenuación puede producirse por reflexión de ondas, dispersión o conversión en energía cinética o térmica. Un aumento en la frecuencia eleva el coeficiente de atenuación (Mason & Lorimer, 2002).

Desde un punto de vista general, todos los efectos producidos por los ultrasonidos podrían influir en los fenómenos de transferencia de masa y/o calor. Los efectos directos de transferencia de masa se dan tanto en alimentos secos como en húmedos, donde puede acelerar el transporte interno, facilitando que los fluidos entren y/o salgan de la matriz sólida, y también puede promover el intercambio de materia entre la superficie sólida y el fluido circundante, mejorando la cinética del proceso y el rendimiento final (García-Pérez et al., 2007; Miano et al., 2016; Riera et al., 2004; Tsotsas & Mujumdar, 2007; Villamiel et al., 2017).

Los mecanismos de calentamiento, turbulencia, agitación, fricción, inestabilidad de la superficie y otros provocados por el ultrasonido derivan de un fenómeno llamado cavitación (Ahmed et al., 2016). Cuando un líquido se somete a ultrasonidos suficientemente potentes, el líquido se comprime y expande alternativamente cuando la potencia ultrasónica alcanza un umbral, donde la rarefacción supera las fuerzas de atracción entre moléculas y, a partir de los núcleos de gas existentes, pueden aparecer burbujas de cavitación. Estas burbujas reaccionan y crecen con los ciclos de compresión y expansión de la onda ultrasónica, lo que hace que se expandan y, cuando alcanzan un tamaño crítico, finalmente colapsan (Figura 2) (Ahmed et al., 2016; Soria & Villamiel, 2010).

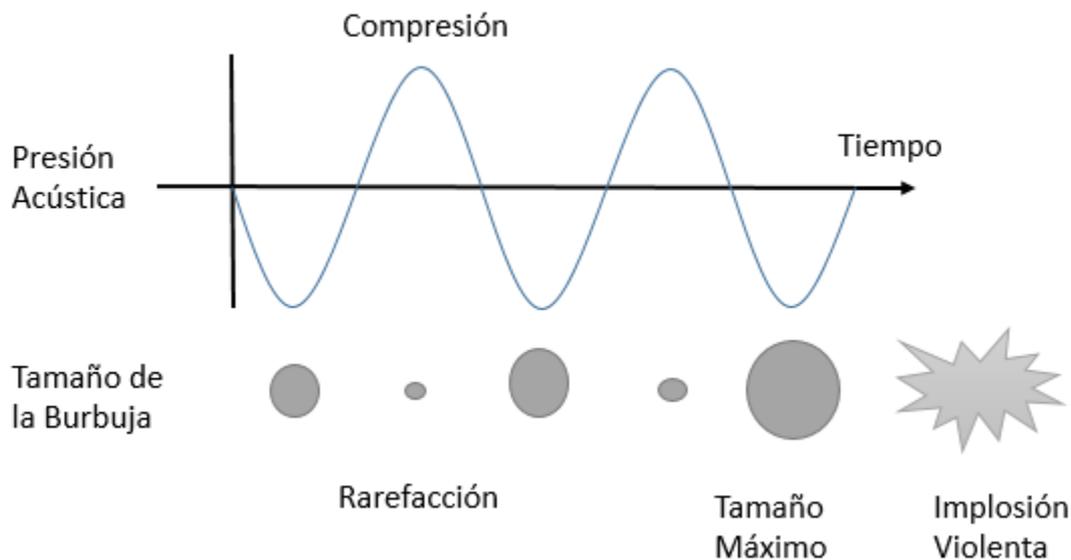


Figura 2: Formación y colapso de burbuja de cavitación

El ciclo estable de tamaño creciente y decreciente se denomina “cavitación estable”, que genera micro agitación del medio, que, al colapsar, dan lugar a temperaturas (5000K) y presiones (1000atm) locales elevadas que producen a su vez ondas de corte de alta energía y turbulencias en la zona de cavitación. Este último efecto se conoce como “cavitación transitoria” (Leighton, 1998) y se observa a bajas frecuencias (20-100 kHz).

Los eventos a microescala de la cavitación transitoria pueden causar fácilmente la ruptura de cadenas de polímeros o el daño de células vegetales y animales (Kentish & Ashokkumar, 2011). En proximidad a una superficie sólida, la burbuja colapsa asimétricamente y genera un micro chorro de fluido o burbujas (Lee et al., 2007) puede ser emitido desde la burbuja directamente hacia la superficie sólida, lo que puede provocar picaduras y erosión (Povey & Mason, 1998), efecto utilizado principalmente en operaciones de limpieza, aunque también pueden producir una inyección de líquido dentro del sólido (Mason & Cordemans, 1996). La intensidad de la cavitación y sus efectos dependen de las características del medio, como la viscosidad, y / o variables del proceso, como la intensidad ultrasónica, la frecuencia ultrasónica o la presión (Tsotsas & Mujumdar, 2007).

El ultrasonido de alta intensidad también puede generar el llamado viento sonoro (o flujo acústico) en la interfaz sólido-gas, que afecta la resistencia externa a la transferencia de masa al aumentar el transporte de volumen dentro del fluido (Mulet et al., 2003; Villamiel et al., 2017). Las compresiones y expansiones mecánicas de alta intensidad producidas en las interfaces crean microcorrientes, que se forman en las inmediaciones de la superficie sólida (Arkhangel'skii & ARKHANGEL'SKII, 1973; Borisov & YA, 1973) y

ejercen una influencia importante reduciendo el espesor de la capa límite. Además, las variaciones de presión mejoran la tasa de evaporación porque durante la fase negativa del ciclo de presión, el agua se retira y no vuelve a entrar en la fase positiva (Gallego-Juárez, 1998; Gallego-Juárez & Graff, 2014).

En materiales sólidos, las ondas ultrasónicas producen una serie de compresiones y expansiones rápidas y cíclicas del material que se pueden comparar con una esponja exprimida y liberada repetidamente (De la Fuente-Blanco et al., 2006; Floros & Liang, 1994; Liang, 1995). Esta tensión mecánica, conocida como “efecto esponja”, ayuda a que el líquido fluya de la parte interna de una partícula a su superficie a través de canales naturales u otros canales creados por la propagación de ondas (Gallego-Juarez et al., 1999; Soria & Villamiel, 2010). Las fuerzas involucradas en este mecanismo pueden ser superiores a la tensión superficial que mantiene las moléculas de agua dentro de los capilares del material, creando canales microscópicos (Muralidhara et al., 1985)

Mediante compresiones y expansiones intensas, el ultrasonido puede crear microcanales que son mejores vías, mejorando la tasa de remoción de agua (Muralidhara et al., 1985), alterando la microestructura y facilitando la difusión interna. Al alcanzar los niveles de energía acústica necesarios para inducir la cavitación, se contribuiría a la eliminación de la humedad más fuertemente adherida del sólido (Gallego-Juarez et al., 1999), que se utiliza en las áreas farmacéuticas, químicas y petroleras para eliminar restos de disolvente (Gallego-Juárez & Graff, 2014).

En medios gaseosos, el ultrasonido puede producir efectos intensos en las interfaces, como variaciones de presión, inestabilidades interfaciales o micro-agitación, que también pueden afectar los fenómenos de transferencia de masa y calor (Cárcel et al., 2007) reduciendo el espesor de la capa límite y facilitando el intercambio de materia. Otros efectos a considerar son la variación de la viscosidad, la tensión superficial o la deformación/degradación de la estructura sólida (Tsotsas & Mujumdar, 2007) .

Estos efectos de la capa límite como microchorros y patrones de flujo acústico se presentan fuertemente a pocos milímetros de la superficie, reduciendo la resistencia y mejorando la cinética de transferencia de calor y masa al concentrar la disipación de energía acústica en estas áreas, a menudo más efectivo que otras opciones menos específicas del sitio, como los mezcladores de alto cizallamiento (Kentish & Ashokkumar, 2011; Szadzińska et al., 2019; Tsotsas & Mujumdar, 2007; Villamiel et al., 2017). El efecto positivo en los procesos de transferencia de calor y masa se utiliza

para la asistencia de los procesos de secado (García-Pérez et al., 2006; Schössler et al., 2012; Simal et al., 1998; Yanniotis et al., 2013).

El ultrasonido se presenta en la industria alimentaria como técnica benigna. Las ondas sonoras generalmente se consideran seguras, no tóxicas y respetuosas con el medio ambiente; esto le da al uso del ultrasonido una gran ventaja sobre otras técnicas en diversos procesos. Respecto al secado, representa un medio para la deshidratación de alimentos sin afectar las principales características y calidad del producto (Khmelev et al., 2006). Se puede lograr en tiempos reducidos bajo temperaturas del aire más bajas, pero sin cambios dramáticos en la estructura de la muestra. Esto puede tener una aplicación importante en la deshidratación de alimentos de alto valor, como los que son sensibles al calor o contienen compuestos bioactivos frágiles (Feng et al., 2011; Ratti, 2008).

El ultrasonido de alta potencia puede mejorar un proceso de secado modificando el comportamiento químico y físico del producto durante el secado mediante asistencia acústica (pretratamientos como inmersión en medio líquido) o intervención durante el propio proceso de secado en medio gaseoso. (Dibagar et al., 2020). El mecanismo de acción principal es el de favorecer la creación de micro canales, generados por cavitación inter y extra celular del agua, que además genera turbulencias de aire en la capa aire-producto, que facilita la eliminación de humedad de la superficie (Yao, 2016). Por lo tanto, se puede utilizar un tratamiento ultrasónico en el proceso de deshidratación para aumentar la velocidad de transferencia de masa, y por otro lado, la ganancia de humedad para los procesos de rehidratación (Başlar et al., 2015).

En el pretratamiento directo, los fenómenos de microcorriente en la estructura del material intensifican la transferencia de masa y calor. Esto aumenta la difusividad efectiva del agua, generando una reducción de un 16% en el tiempo de secado (Opalić et al., 2009). Este aumento de la difusividad alcanza hasta en un 28.8% después de 20 min de ultrasonido, favorecido por la formación de microcanales en la estructura del material (Fernandes, Oliveira, et al., 2008; Pakbin et al., 2015). El efecto es más intenso en la liberación de sólidos solubles en agua durante el baño ultrasónico (Fernandes, Oliveira, et al., 2008; Ishtiaq et al., 2009; LeLAS, 2007; Pakbin et al., 2015), contribuyendo a aumentar la absorción de agua del producto seco después del proceso de secado (Pakbin et al., 2015; Yildirim et al., 2010).

En tratamientos directos, el ultrasonido se puede hacer individualmente o combinado con otros métodos de secado, como la deshidratación osmótica y con aire caliente (Riera et al., 2002). Durante el secado, las ondas ultrasónicas de alta intensidad producen una serie rápida de contracciones

y expansiones alternativas (efecto esponja) del material sólido que facilita el transporte de humedad dentro del sólido. El agua ligada por su parte, se puede desacoplar sin esfuerzo en presencia de la cavitación, que genera una mayor transferencia de calor y masa, mejorando la eliminación de humedad (Cárcel et al., 2007; Moses et al., 2014; Ratti, 2008). Al aumentar la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado, el tratamiento ultrasónico utilizado con el secado con aire caliente puede reducir la potencia de entrada a aproximadamente un 20% en comparación con los sistemas de secado ultrasónico no tratados (Khmelev et al., 2011)

II.3.3. Flujo de Marangoni

El efecto Marangoni le debe su nombre al físico italiano Carlo Giuseppe Mateo Marangoni, quien describió el proceso en 1871 al investigar la difusión de gotas de aceite en la superficie del agua (Marangoni, 1871). El efecto explica un comportamiento como la manifestación macroscópica de un flujo de líquido como resultado de diferencias locales (gradientes) en la tensión superficial, ocurriendo transferencia de masa impulsada por la gradiente de presión que procede de regiones de alta tensión superficial hacia una zona de baja tensión superficial entre dos fluidos, gracias a fuerzas que ocurren como consecuencia de la falta de homogeneidad en la energía de la superficie libre de una superficie sólida o líquida (Figura 3) (Bird, 2002; Fyen et al., 2008; Rapp, 2016).

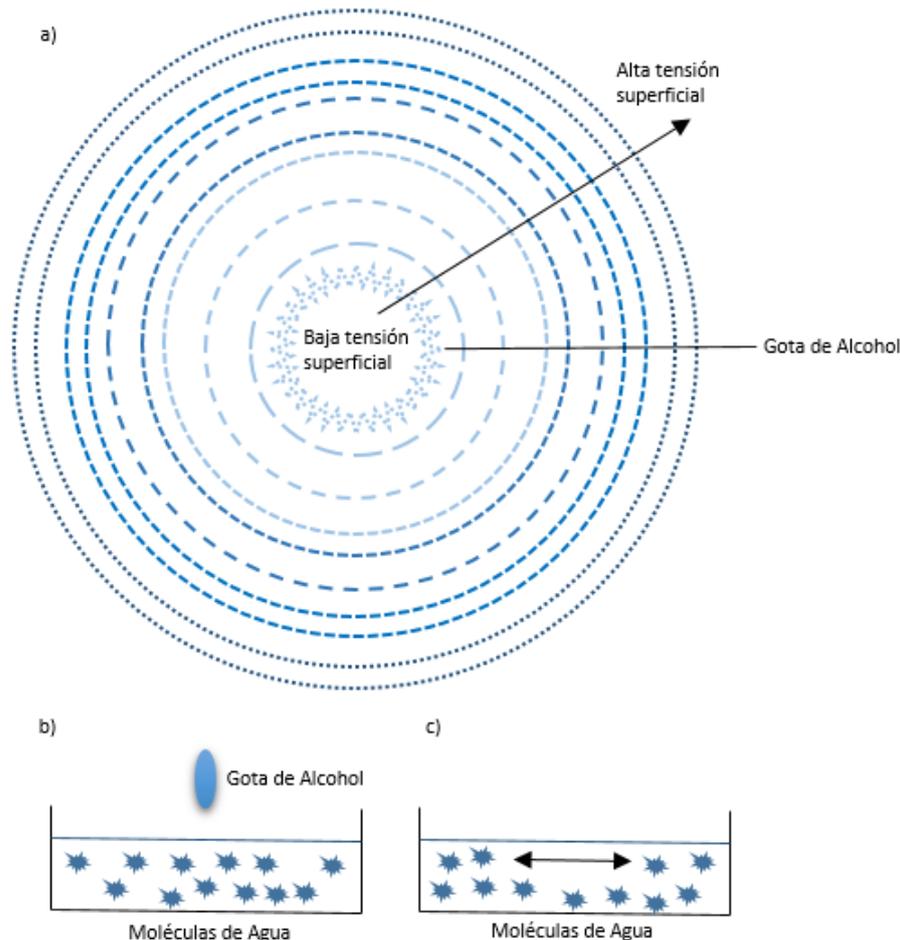


Figura 3. a) Flujo de Marangoni. La modificación del medio mediante la adición de un surfactante (alcohol) (b) genera fuerzas que impulsan movimiento desde zonas de baja tensión superficial a zonas de alta tensión superficial (c)

Este comportamiento había sido previamente observado en las lágrimas de vino, un fenómeno bien conocido que puede describirse como la formación continua de perlas líquidas que caen por el interior de una copa de vino fija, reportado en 1885, 15 años antes que Marangoni (Thomson, 1855). Siendo el vino una mezcla de agua y alcohol, al mojar la superficie de la copa, forma un menisco debido a la acción capilar, que aumenta el área de superficie y la evaporación, a donde aumentará la gradiente de tensión de superficial, atrayendo el líquido en una película gruesa, formando una cresta a la parte superior de la copa, coexistiendo, vidrio, vino y aire. Eventualmente colapsará y caerá hacia el menisco, que conecta con la cresta en la película fina líquida, donde el flujo ascendente es impulsado por una tensión de Marangoni (Bush, 2014; Nikolov et al., 2018; Rapp, 2016; Venerus & Simavilla, 2015).

Los flujos Marangoni impulsados por tensión superficial (σ) depende tanto de la temperatura como de la composición química en la interfaz, pudiendo

generarse por ambos o uno de ellos. El balance de tensiones tangenciales en una superficie libre:

$$nTt = -t\nabla\sigma$$

donde n es la unidad normal hacia afuera a la superficie, y t es cualquier vector unitario tangente (Bush, 2014).

Este efecto es utilizado en las películas de jabón para su estabilidad, creando gradientes de tensión superficial con gradientes de temperatura y transferencia de masa (Biswas & Manna, 2018; Hayat et al., 2017; Poursamad et al., 2013). En el secado de obleas de silicio se utiliza para la fabricación de circuitos integrados al extraer las manchas del líquido de la superficie de la oblea mediante gradientes de presión (Hibiya et al., 2001; Kotěna et al., 2017; Tilli, 2020). También es importante en el auto ensamble de nano partículas, para hacer crecer nanotubos ordenados mediante alcohol y flujo de aire húmedo (Gultekinoglu et al., 2020; Jencyk et al., 2017; Su et al., 2019).

Recientemente se ha estudiado su uso en la industria alimentaria, en específico en el secado de alimentos. El uso de etanol como medio favorece los fenómenos de transferencia de agua por el efecto Marangoni durante el secado (M. L. Rojas et al., 2020). Siendo un disolvente orgánico, logra disolver los componentes de la pared celular, donde a nivel metabólico puede llegar a inhibir la síntesis de los componentes que la conforman (celulosa y hemicelulosa) (Herppich et al., 2015). Al extraer el agua del interior de la muestra y reemplazarla por etanol, disminuye el tiempo de secado en comparación con muestras in natura, llegando a incrementar la permeabilidad en la estructura durante la deshidratación y rehidratación y promover la pérdida de moléculas más grandes (Funebo et al., 2002; Rojas & Augusto, 2018a, 2018b; Wang et al., 2019). El etanol en el interior posee un punto más bajo de ebullición y una menor tensión superficial por lo que produce una evaporación más rápida, dejando un vacío en las muestras y en los canales de flujo desde el centro hacia la superficie que forman poros en la muestra, creando canales de flujo que favorecen el proceso de secado, disminuyendo el consumo energético, mejoran retención de sustancias volátiles y conservan aspectos cualitativos del alimento (Braga et al., 2009; Feng et al., 2019; M. Rojas et al., 2020; Rojas & Augusto, 2018a, 2018b; M. L. Rojas et al., 2020; K. C. Santos et al., 2020).

II.4. Marco conceptual (terminología)

- ❖ Secado: El secado es una de las formas más rentables de conservar alimentos de todas las variedades que implica la eliminación de agua mediante la aplicación de calor (Jangam et al., 2010).

- ❖ Ultrasonido: Tecnología no térmica utilizada cada vez más en la industria alimentaria. Mediante vibraciones mecánicas de suficiente intensidad, los ultrasonidos de potencia pueden producir cambios en los alimentos, ya sea alterando su estructura o promoviendo determinadas reacciones químicas (Ahmed et al., 2016).
- ❖ Rehidratación: Reconstitución de humedad de productos deshidratados para recuperar volumen, forma y calidad originales (Chen & Mujumdar, 2009).
- ❖ Flujo Marangoni: Transferencia de masa impulsada por la gradiente de tensión superficial, como resultado, un líquido en una superficie fluiría hacia áreas de baja energía superficial (Rapp, 2016).

III. HIPÓTESIS

III.1. Declaración de Hipótesis

III.1.1. Hipótesis general

La aplicación de etanol y ultrasonido como pretratamientos combinados acelerará la cinética de secado y rehidratación. Además, la orientación de cómo se corta la muestra también afectará el proceso

III.1.2. Hipótesis específicas

- ❖ La potencia de ultrasonido acelerará la cinética de secado y rehidratación
- ❖ Cada orientación del corte tendrá una influencia diferente en la cinética de secado y rehidratación
- ❖ El ultrasonido y el flujo de Marangoni acelerarán la cinética de secado y rehidratación
- ❖ La combinación de ultrasonido con el flujo Marangoni tendrá un impacto positivo en la estructura y textura

III.2. Operacionalización de variables

Variable	Tipo de Variable	Operacionalización		Dimensiones (Sub-variables)	Definición conceptual	Indicador	Items	Nivel de Medición
	Según su naturaleza	Definición Conceptual	Definición Operacional					
Aplicación del Ultrasonido	Discreta	Aplicación de ondas acústicas de 40 kHz en un tiempo	Tiempo que se mantiene la muestra a el baño de	Frecuencia	Frecuencia de ondas de sonido determinada por la fuente emisora	kHz	Referencia bibliográfica	Razón
				Potencia		W	Referencia bibliográfica	

Aplicación de Etanol	Continua	determinado	ultrasonido		Cantidad de energía emitida por el ultrasonido			Razón
		Pretratamiento mediante inmersión de la muestra en etanol	Tiempo que se mantiene la muestra en el baño de ultrasonido	Tiempo	Tiempo de inmersión de muestras en etanol	Minutos (min)	Referencia bibliográfica	
				Cantidad de etanol	Proporción de etanol respecto a cilindros de la muestra	Volúmenes (V / V)	Referencia bibliográfica	
Orientación de Corte	Discreta	Tipo de corte con referencia al tejido vascular de la muestra.	Corte de cilindro cuya altura es paralela o perpendicular a las fibras.	Transversal	Corte horizontal al diámetro	Adimensional	Referencia bibliográfica	Ordinal
				Longitudinal	Corte perpendicular al diámetro	Adimensional	Referencia bibliográfica	
Parámetros cinéticos de secado	Continua	Parámetros del modelo matemático del secado	Variables de ajuste y control del proceso de secado	Tiempo de Secado	Tiempo de proceso de secado donde se elimina el agua de las muestras hasta un nivel deseado	Segundo (s)	Referencia bibliográfica	Razón
				Constante de Secado Adimensional (n)	Variable que describe el "tipo de difusión"	Adimensional	Referencia bibliográfica	
				Velocidad de secado constante (k)	Medidas que definen el porcentaje de varianza de regresión del modelo	Minuto elevado a la potencia "-n" (min-n)	Referencia bibliográfica	
Parámetros cinéticos	Continua	Parámetros del	Variables de		Tiempo de adsorción de agua	Segundo (s)	Referencia bibliográfica	Razón

de rehidratación		modelo matemático de rehidratación	ajuste y control del proceso de rehidratación	Tiempo de Rehidratación (n)	por parte del material para la recuperación de su tamaño y volumen inicial		
				Constante de velocidad (K1)	Constante que cuantifica la tasa (transferencia de masa) de absorción inicial de humedad	min.b.s.-1	Referencia bibliográfica
				Constante de Capacidad (K2)	Capacidad de absorción de humedad	b.s.-1	Referencia bibliográfica
Encogimiento	Continua	Fenómeno físico común del producto seco a consecuencia de la reducción de su volumen externo.	Diferencia de medidas iniciales (altura, diámetro) del producto seco con el producto inicial	Diámetro	Segmento del cilindro de la muestra ubicada a lo largo de sus bases circulares	cm	Referencia bibliográfica
				Espesor	Longitud entre las bases circulares	cm	
							Razón

IV. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS Y ANÁLISIS

IV.1. Tipo de investigación:

Experimental

IV.2. Nivel de investigación:

Experimental

IV.3. Diseño de investigación:

Experimental

IV.4. Método de investigación:

Experimental

IV.5. Población:

10 piñas de la variedad *Ananas comosus cv Perola*

IV.6. Muestra:

3kg del corazón de las piñas cortadas en cilindros de 1.0cm de altura y 1.5 de diámetro en cortes transversal y longitudinal.

IV.7. Unidad de estudio:

Alimentos Frescos

IV.8. Técnicas de recolección de datos

IV.8.1. Técnica:

Documentación

IV.8.2. Instrumento:

Tablas de recolección

IV.9. Presentación de resultados:

IV.9.1. Materia Prima:

Este trabajo estudiará los procesos de secado y rehidratación del cilindro central (núcleo) de la piña, el cual fue elegido por su estructura representativa presentando capilares. Las piñas (*Ananas comosus cv. Perola*) serán adquiridas del mercado local (Piracicaba, SP, Brasil). Su núcleo se extraerá y se cortará en cilindros de 1.0 cm de altura y 1.5 cm de diámetro con un cuchillo especial. Se obtendrán cilindros con diferente orientación de corte, considerando tanto el corte longitudinal (Lc) como el corte transversal (Tc), tomando como referencia el núcleo de la fibra. Por lo tanto, el corte longitudinal (Lc) se realizará en paralelo al núcleo, mientras que el corte transversal (Tc) será perpendicular al núcleo. Posteriormente, las muestras serán sometidas a pretratamientos con ultrasonido y / o etanol y luego ser secadas.

IV.9.2. Pretratamiento de Secado:

El pretratamiento de etanol se realizará mediante la inmersión de los cilindros de piña en etanol 99,8% (V/V) a 25°C durante 5 minutos (E5) y 10 minutos (E10), utilizando una proporción de cilindros: etanol de 0.02:0.5 (p/v). Para evaluar la combinación de ultrasonido y etanol, las muestras se someterán a inmersión en un vaso de precipitados que contenía etanol durante 5 (E+US5) y 10 (E+US10) minutos, los cuales se colocarán en un baño de ultrasonidos (Q13/25, Ultronique, Brasil; frecuencia de 25kHz, potencia volumétrica de 14,9 W/L - determinada por método calorimétrico) a 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) que contiene 4L de agua destilada. Para mantener la temperatura del pretratamiento ultrasónico (20°C), se utilizará un baño de agua termostático (ColdLab CL 16-40, Brasil) y un intercambiador de calor que recirculará una solución fría de etanol / agua. Después de los pretratamientos, las muestras se retirarán, se secarán con papel absorbente para eliminar el exceso de

etanol y se pesarán. Después de eso, las muestras se secarán inmediatamente.

IV.9.3. Secado Convectivo:

El proceso de secado por convección se realizará en un horno con circulación y renovación de aire (MA 035, Marconi, São Paulo, Brasil), utilizando aire caliente a 50°C y ~1.0 m.s⁻¹. Las muestras tratadas y de control serán colocadas en bandejas de acero perforadas, para permitir que el aire circule sobre las muestras. Durante el secado, las bandejas de acero con las muestras se sacarán del horno a intervalos de tiempo específicos y se pesaron. El contenido de humedad inicial (*in natura*, control y muestras pretratadas) y final (después del secado) será medido secando completamente las muestras trituradas a 105°C en un analizador de humedad (MX-50, A & D Company, Tokio, Japón).

Luego se obtendrá toda la humedad en cada tiempo por balance de masa, considerando el contenido de humedad inicial de la muestra. Según Silva et al. (2014) y Rojas & Augusto (2018b), la "humedad" de la muestra después del pretratamiento con etanol corresponde tanto al agua como al etanol, ya que parte del agua es removida de la muestra por etanol y el etanol es absorbido por la muestra. Por lo tanto, durante el proceso de secado, la pérdida de masa incluye ambos líquidos. La cinética de secado se trazará usando la relación de humedad adimensional (MR) en función del tiempo del proceso de secado (t), calculado de acuerdo con la Ec. (1) - donde, "M" es el contenido de humedad en base seca en el tiempo de secado (t), "M_∞" es la humedad de equilibrio en base seca después del proceso de secado y "M₀" es la humedad de la muestra, en base seca, antes del secado (es decir, el corazón de piña fresca en el tratamiento de control y los que se encuentran después de pre tratamiento para los otros tratamientos). Todas las curvas trazadas presentan valores de "MR (t)" iguales a uno al inicio del proceso de secado.

$$MR(t) = \frac{M - M_{\infty}}{M_0 - M_{\infty}} \quad (1)$$

El modelo de Page (Page, 1949) se utilizará para representar la cinética de secado-Ec (2), donde "MR_t" es la humedad adimensional, "t" es el tiempo de secado (min), "k" es el parámetro asociado con la velocidad de secado. (min⁻ⁿ) y "n" es el parámetro adimensional asociado con el comportamiento de secado.

$$MR_t = \frac{M_t - M_{\infty}}{M_0 - M_{\infty}} = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

Si bien el modelo de Page es un modelo empírico, recientemente (Simpson et al., 2017) demostró que la difusión anómala, basada en el cálculo fraccional, puede darle una interpretación fenomenológica: el parámetro “k” puede asociarse con el coeficiente de “difusión” y el geometría de la muestra, mientras que el parámetro “n” describe el “tipo de difusión”. Por tanto, el secado se puede caracterizar como superdifusión ($n > 1$), difusional ($n = 1$) y subdifusión ($n < 1$). Por tanto, n también puede estar asociado a la microestructura de los alimentos, y cuando $n \neq 1$ son importantes otros mecanismos además de la difusión, como el efecto de capilaridad (Rojas & Augusto, 2018b).

IV.9.4. Proceso de Rehidratación:

Después de secar, las muestras se rehidratarán por inmersión en agua. Para ello, se sumergirán aproximadamente 3g de muestra seca en un vaso de precipitados que contenía un litro de agua destilada, los cuales se colocarán en un baño de agua a 25°C (MA 0,95 / CFRE, Marconi). El aumento de la muestra de humedad durante el tiempo de rehidratación se determinará mediante balance de masa, utilizando el contenido de humedad inicial. En momentos concretos, las muestras se retirarán del agua para eliminar el exceso de agua con papel absorbente. Se pesarán y luego se devolverán al agua, repitiendo el proceso hasta que las muestras alcancen la estabilización por absorción de agua. Se utilizará el modelo de Peleg (Peleg, 1988) para ajustar los datos de rehidratación representado por la ecuación 3 donde se describe el contenido de humedad en base seca M_t (%db) en cualquier momento t (min) de hidratación, donde M_0 corresponde al contenido de humedad inicial (% base seca), k_1 es el parámetro de velocidad (min /% base seca) y k_2 es el parámetro de capacidad (%base seca-1). La inversa de los parámetros k_1 y k_2 corresponden a la tasa de absorción inicial y al equilibrio de capacidad de retención de agua / humedad, respectivamente.

$$MR = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (3)$$

IV.9.5. Evaluación Estructural:

La evaluación de la textura se realizará con la muestra *in natura*, después de los pretratamientos y después de la rehidratación. El análisis se realizará mediante compresión uniaxial de las muestras cilíndricas utilizando un Analizador de Textura (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., Reino Unido) con una carga de 50 kg^f (490.3N). Se utilizará una sonda cilíndrica de 35 mm (P/35R) para comprimir las muestras hasta 5 mm en relación a su altura (10 mm) a una velocidad de 1 mm.s⁻¹. Los datos de fuerza (N) versus deformación (%) serán registrados cada 0.005 segundos, trazando una

gráfica con los datos obtenidos que representan la deformación de la muestra, y el pico máximo registrado será considerado la fuerza máxima de deformación

IV.9.6. Encogimiento:

Se evaluará la contracción del núcleo de la piña después de los pretratamientos y después del secado. Para ello, las muestras serán estandarizadas con dimensiones iniciales (*in natura*) de 1.0 cm de altura y 1.5 cm de diámetro, midiendo luego la contracción con un calibre digital y para ser representadas calculando el área de la muestra equivalente al área del cilindro. Además, se obtendrán porcentajes de reducción en altura y diámetro después del pretratamiento y después del secado de la muestra en comparación con la muestra *in natura*.

IV.9.7. Análisis Estadístico:

Todos los experimentos y análisis se realizaron con tres repeticiones. El ajuste de los modelos matemáticos de Page (ecuación 2) y Peleg (ecuación 3) se realizará mediante regresión no lineal utilizando la herramienta complementaria Solver de Microsoft Excel 2020 (Microsoft, EE. UU.). La minimización de la suma de errores cuadrados (SSE, Ec. 4) entre los datos experimentales ($M_{experimental}$) y los datos predichos (M_{model}) será utilizada como criterio objetivo.

$$SSE = \sum_{i=1}^x [(M_{model}) - (M_{experimental})]_i^2 \quad (4)$$

Para la evaluación estadística se utilizó un diseño completamente aleatorizado (CRD). Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) y los promedios se compararon mediante la prueba de Tukey utilizando un intervalo de confianza del 95% ($p < 0.05$), evaluados y determinados por el software Minitab versión 18 (Minitab, LLC., EE. UU.). Los resultados del análisis de datos se expresaron como promedio \pm desviación estándar.

V. RESULTADOS

V.1. Efecto de la estructura, ultrasonido y flujo de Marangoni en los procesos de secado y rehidratación.

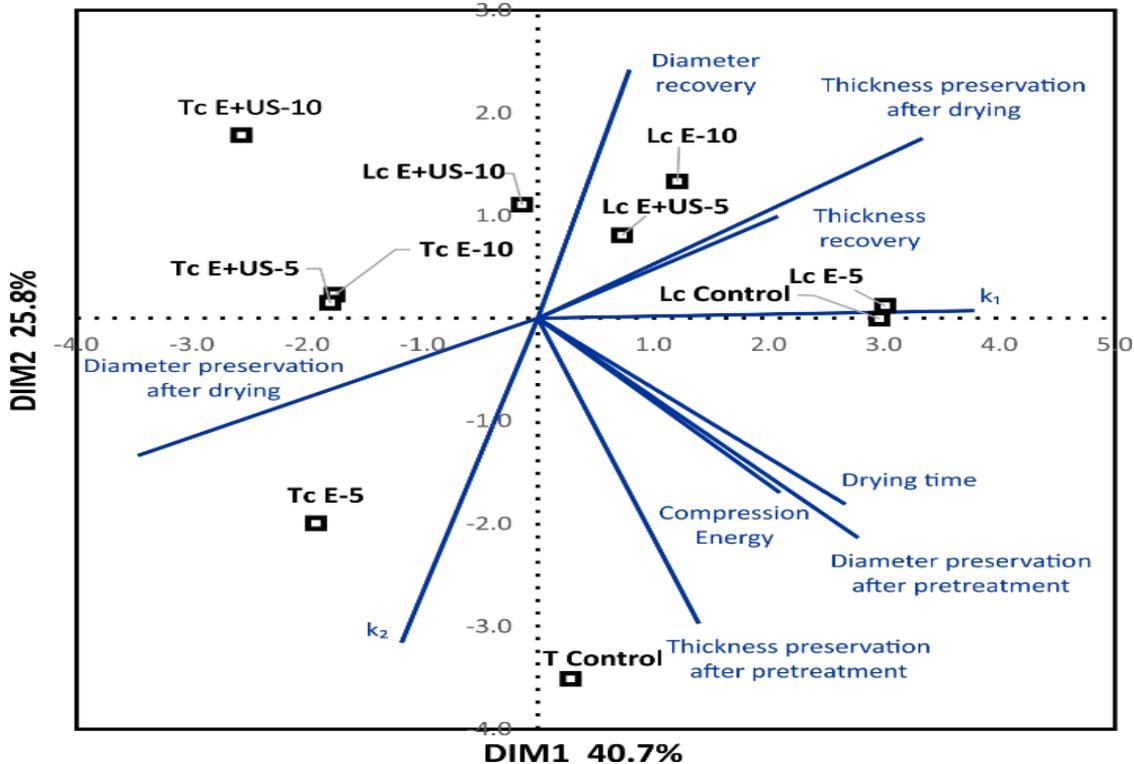


Figura 4. Análisis de Componentes Principales (ACP) que asocian los pretratamientos realizados en cuanto a su efecto sobre las variables dependientes

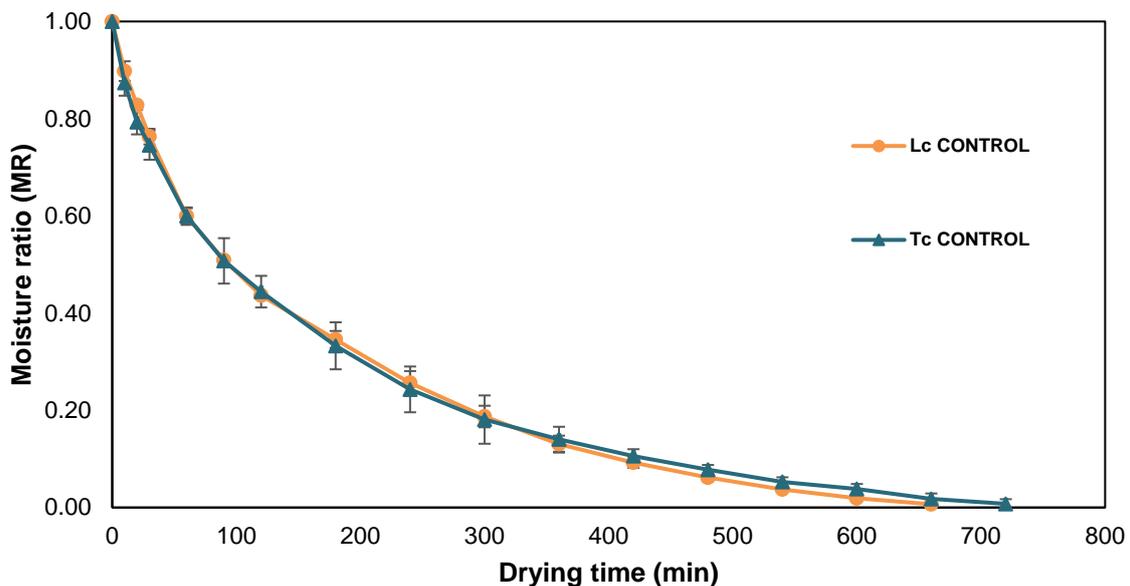
La Figura 4 representa el Análisis de Componentes Principales (PCA) asociando los pretratamientos según su efecto sobre las variables dependientes. Al reducir a 2 dimensiones (Dim 1 y Dim 2), PCA explicó el 66.5% de las variables dependientes que fueron significativamente afectadas por los pretratamientos. Además, PCA muestra asociación de pretratamientos que tuvieron efectos similares al proceso. Como principales observaciones del análisis PCA, se encontró:

- La recuperación del diámetro después de la rehidratación se correlacionó positivamente con k_2 del modelo de Peleg. Esto podría significar que los cilindros que más recuperan diámetro también absorben más agua (más contenido de humedad de equilibrio). Recordando que el contenido de humedad de equilibrio está relacionado con el inverso de k_2 .
- La conservación del diámetro después del secado se correlaciona negativamente con la conservación del espesor después del secado. Esto puede significar que los cilindros que conservaron en mayor medida su diámetro conservaron en menor medida su grosor y viceversa, lo que se asocia con la asociación de haces vasculares.

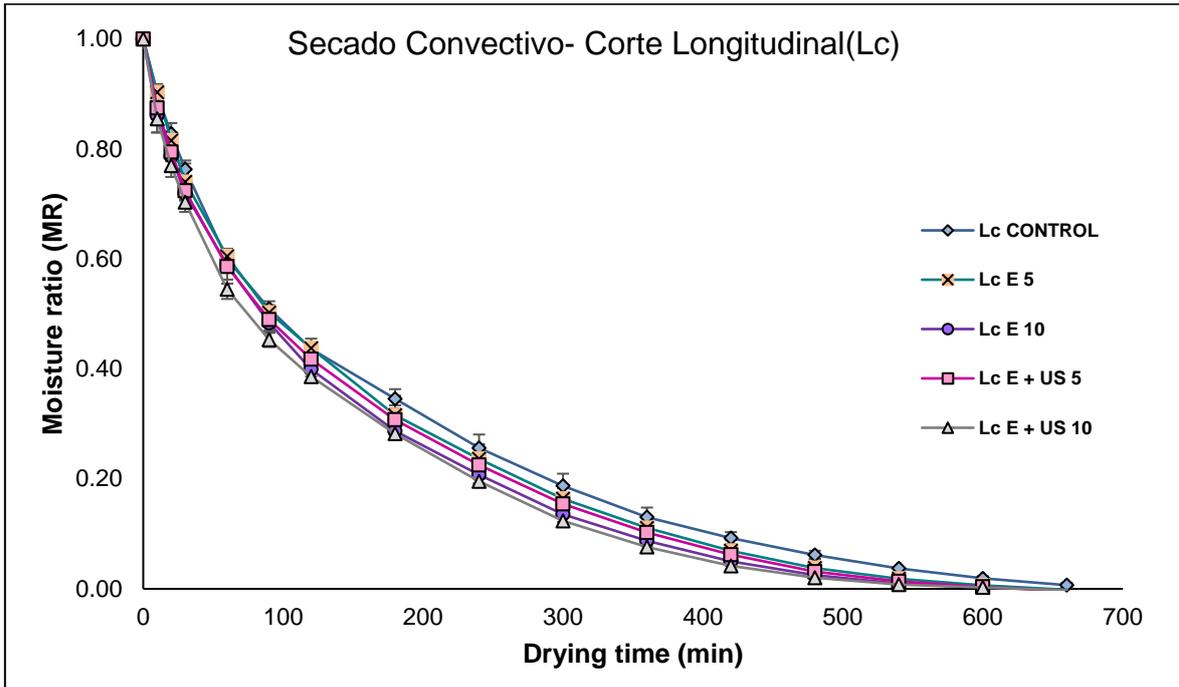
- La recuperación del diámetro después de la rehidratación se correlacionó positivamente con la preservación del espesor después del secado. Esto podría significar que los cilindros que conservan mejor su espesor después del secado tienden a recuperar mejor su diámetro después de la rehidratación.
- La conservación del diámetro después del secado se correlacionó negativamente con el parámetro k_1 del modelo de Peleg. Esto puede significar que los cilindros con mejor conservación del diámetro después del secado se rehidratan más rápido porque tienen un área más grande para la transferencia de masa. De hecho, los cilindros de Tc secos tenían aproximadamente un 116 % más de área expuesta que los cilindros de Lc secos.
- Las muestras Lc control y Lc E-5 min son similares en cuanto a mayor valor de k_1 , lo cual se comprobó en la sección de rehidratación. Por otro lado, Tc control y Tc E-5 min son tratamientos muy divergentes respecto a los demás.

V.2. Determinar la influencia de la combinación de tecnologías (ultrasonido y flujo de Marangoni(etanol)) y la orientación del corte en las cinéticas y tiempos de secado y rehidratación

a)



b)



c)

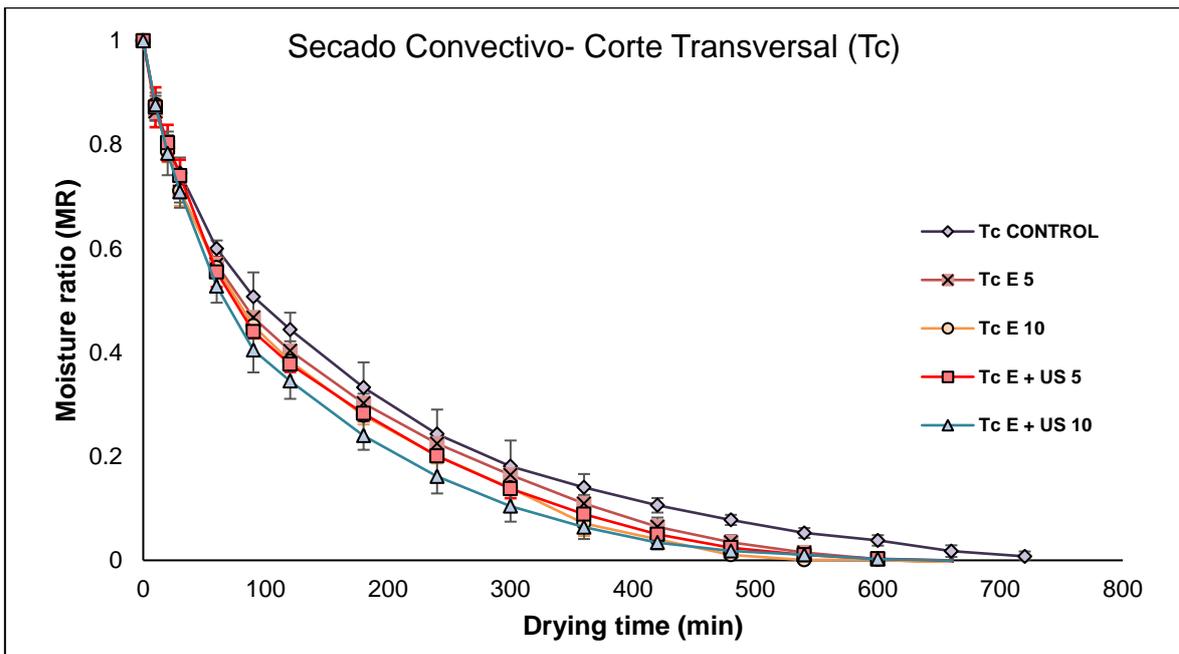
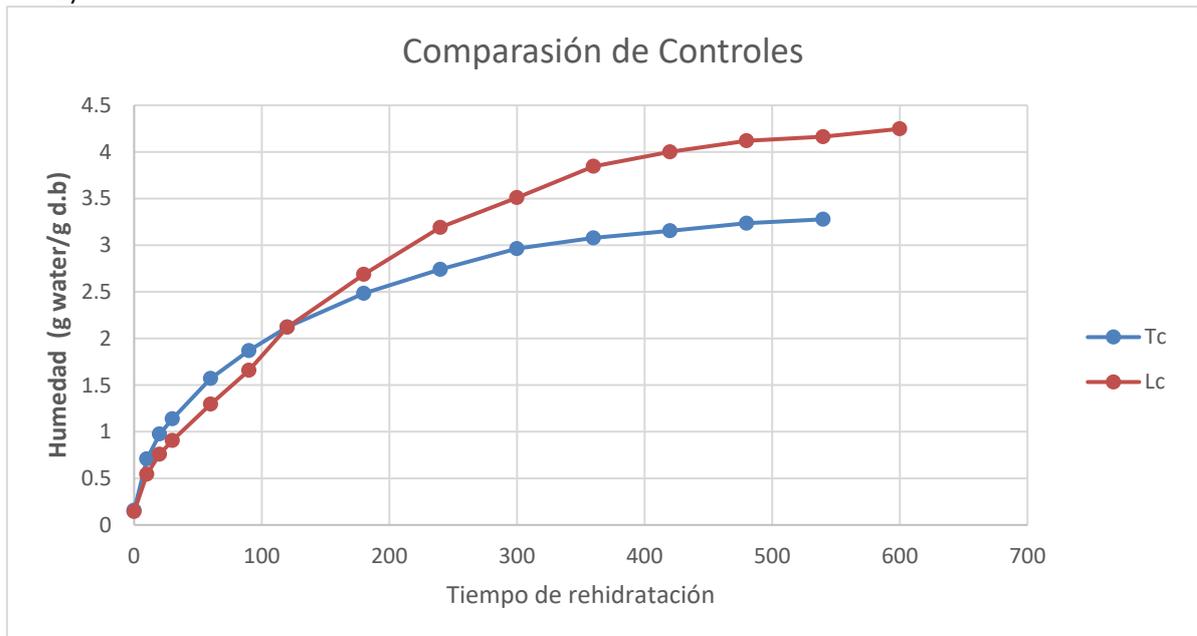


Figura 5. Cinética de secado convectivo del corazón de piña con diferentes tratamientos (Control, Etanol-5 min (E5), Etanol-10 min (E10), Etanol+Ultrasonido 5 min (E+US5), Etanol+Ultrasonido 10 min (E+US10) (a) Comparación entre testigos con corte longitudinal (Lc) y transversal (Tc), (b) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Lc y (c) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Tc.

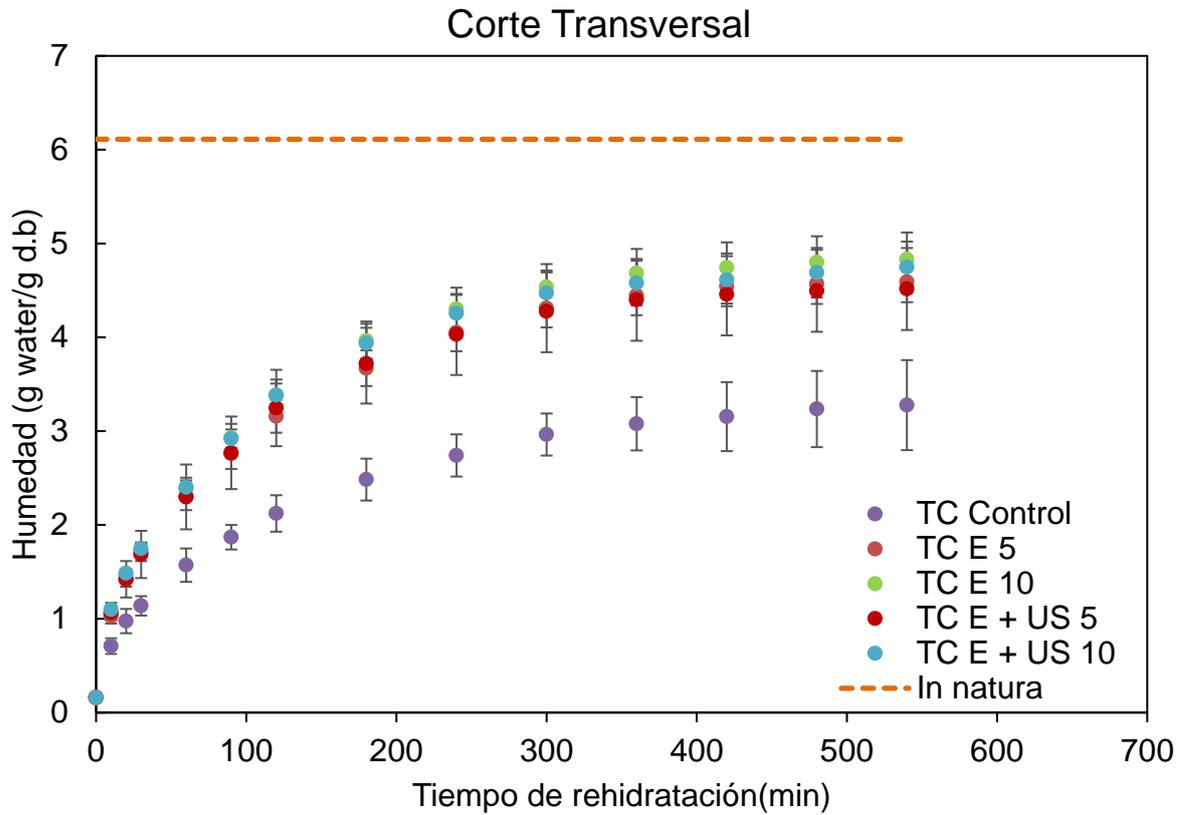
La Figura 5 muestra el contenido de humedad adimensional (MR) del corazón de la piña durante el secado de muestras de Lc y Tc sin pretratamiento (Control) (Figura 5A) y pretratadas (E-5, E-10, E + US-5, E + US-10), para cortes longitudinales (Figura 5B) y transversales (Figura 5C). En cuanto al tipo de corte (Figura 5A), parece que no hubo diferencias significativas en el comportamiento

de secado de ambos cortes. Este resultado también se evidenció en el secado de cortes transversales y longitudinales de calabaza (Rojas & Augusto, 2018c). En comparación con el Control, y para ambos cortes, se observó una diferencia más pronunciada durante el secado de las muestras pretratadas con E + US-10 (Figura 5B y 5C). Esto indica que cuanto mayor sea el tiempo de pretratamiento, mejor será el efecto de la aplicación combinada de etanol y ultrasonido.

a)



b)



c)

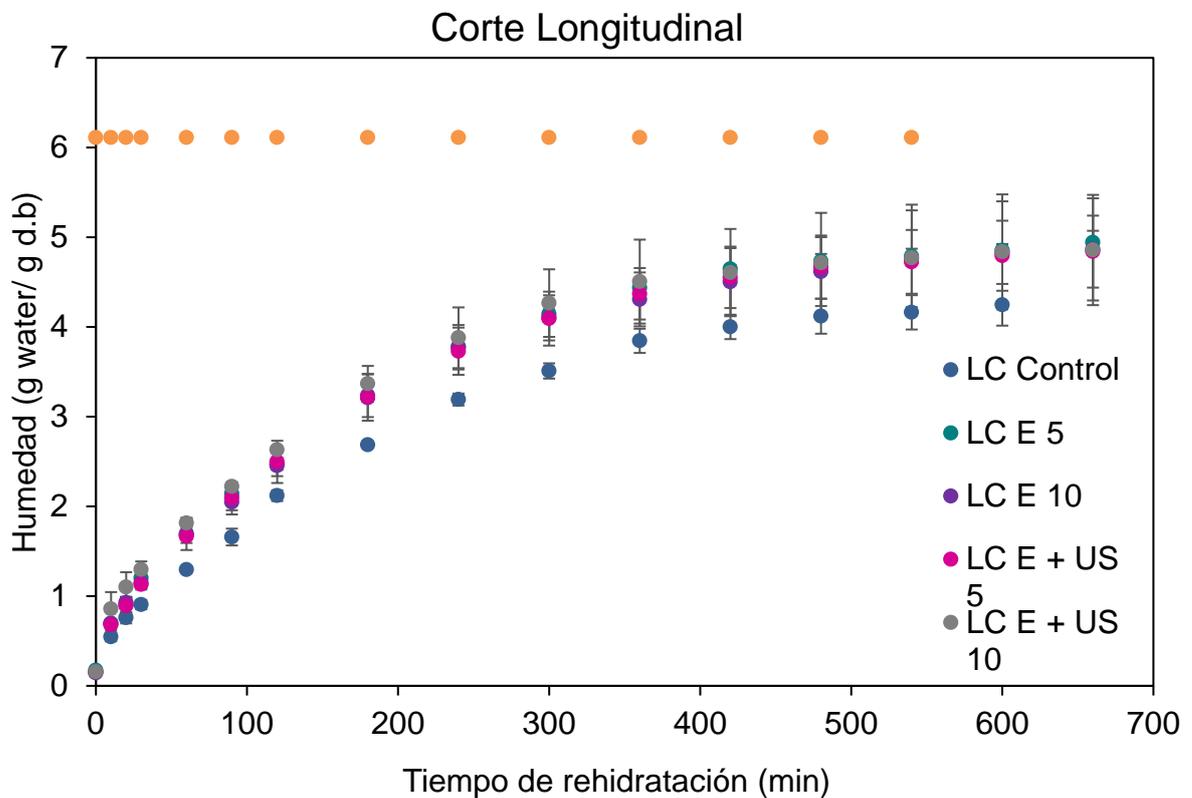


Figura 6. Cinética de rehidratación del corazón de piña en comparación con in natura. (a) comparación entre testigos con corte longitudinal (Lc) y transversal (Tc), (b) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Tc y (c) comparación entre tratamientos aplicados en muestra con Lc.

La Figura 6 muestra el contenido de humedad durante la rehidratación de las muestras de núcleo de piña comparando cortes controles (Figura 6a), transversales (Figura 6b) y longitudinales (Figura 6c), bajo las mismas condiciones operativas. A diferencia de los resultados del secado, la cinética de rehidratación se vio afectada por el tipo de corte. Según la Figura 6a, al inicio del proceso, parece que el corte transversal (Tc) se rehidrata más rápido que el corte longitudinal (Lc). Sin embargo, las muestras de Lc alcanzaron un contenido de humedad de equilibrio más alto (aproximadamente un 12% más) que el Tc. Este mismo comportamiento (cruce de cinética de rehidratación) se encontró para muestras de calabaza con cortes de tipo análogo (Rojas & Augusto, 2018c), pero no para la raíz de yacón (De Los Santos Pazos et al., 2021). Esto demuestra que el tipo de materia prima y elementos estructurales conducirán a un efecto diferente en el proceso de rehidratación; por tanto, es necesario realizar más estudios de las condiciones de cada material alimenticio.

Tabla 2

Efecto de los pretratamientos sobre los parámetros del modelo de Page.

Pre-tratamiento	Corte Longitudinal		Corte Transversal	
	n	k (min ⁻ⁿ)	n	k (min ⁻ⁿ)
Control	0.828±0.0112 ^{Aa}	0.016±0.005 ^{Ab}	0.786±0.0359 ^{Aa}	0.020±0.0048 ^{Aa}
E-5min	0.858±0.0259 ^{Aa}	0.015±0.0025 ^{Bb}	0.789±0.0220 ^{Ba}	0.022±0.0029 ^{Aa}
E-10min	0.825±0.0094 ^{Aa}	0.018±0.0011 ^{Aab}	0.822±0.0168 ^{Aa}	0.019±0.0025 ^{Aa}
E+US 5min	0.819±0.0192 ^{Aa}	0.018±0.0014 ^{Aab}	0.823±0.0312 ^{Aa}	0.019±0.0041 ^{Aa}
E+US 10min	0.797±0.0396 ^{Aa}	0.023±0.0048 ^{Aa}	0.832±0.0433 ^{Aa}	0.021±0.0050 ^{Aa}

Diferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre los pretratamientos y diferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas entre las orientaciones de corte mediante el uso de la prueba de Tukey con un 95 % de confianza

La Tabla 2 muestra los valores de los parámetros obtenidos del Modelo de Page (k y n) utilizados para describir la cinética de secado. Como fue descrito por Simpson et al. (2017), el parámetro n está relacionado con el tipo de difusión: $n > 1$ superdifusión, $n < 1$ subdifusión y para $n = 1$ difusión pura. Así, en este trabajo, todos los tratamientos mostraron un comportamiento subdifusivo ($n < 1$). También se reportó un comportamiento subdifusivo en chips de piña fortificados con hierro pretratados con etanol y ultrasonidos y posterior secado convectivo, donde se atribuyó a la estructura y composición de la pulpa de piña, lo que dificulta el proceso de secado (Carvalho, Rojas, et al., 2020). Por el contrario, Rani y Tripathy (2019) informaron $n > 1$ para las rodajas de pulpa de piña de control y pretratadas con ultrasonido (durante 20 y 30 min), siendo mayor en las muestras con un tiempo de pretratamiento

más prolongado (30 min). Esta diferencia probablemente se debió a la variedad de piña utilizada y su estructura y composición inherentes.

Además, no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) para n y k entre los pretratamientos y entre los tipos de cortes (Tabla 2). Indica que los efectos del tipo de cortes, y pretratamientos no fueron suficientes para mostrar cambios significativos en la inclinación de las curvas en la etapa de secado inicial (valor de k) así como en la estructura y mecanismos de transferencia de masa (valor de n). De hecho, esto puede deberse a dos posibilidades: el tiempo de pretratamiento insuficiente y la interacción del etanol con los compuestos del núcleo de la piña, lo que probablemente dificulta la visualización de efectos significativos sobre los parámetros cinéticos.

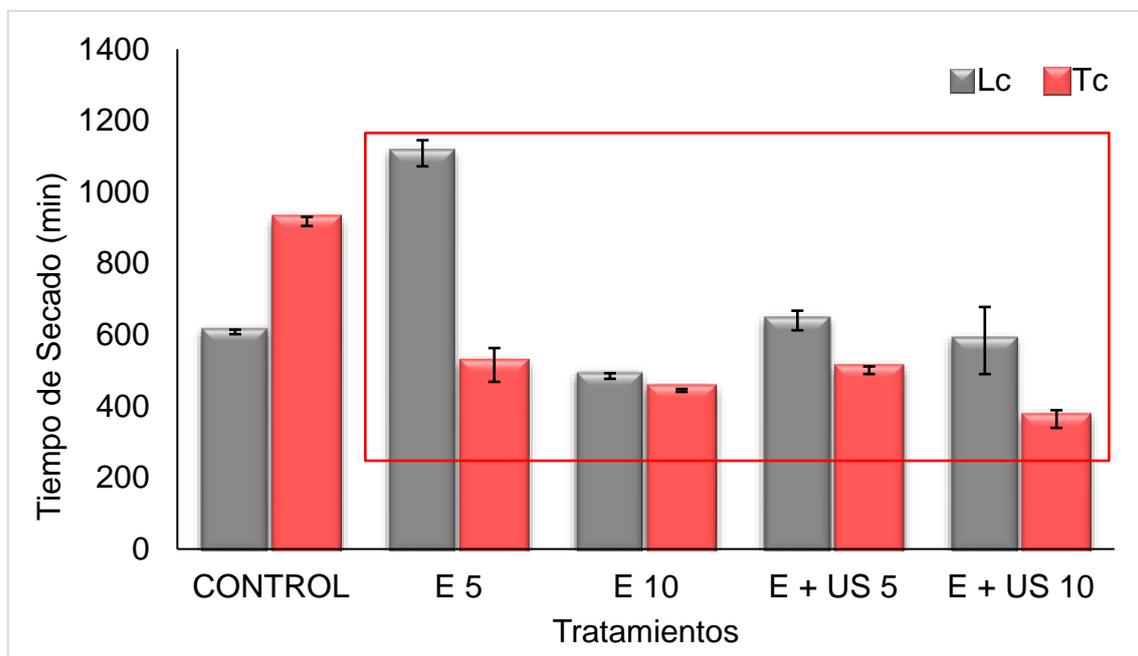


Figura 7. Tiempo requerido para los diferentes tratamientos (Control, Etanol-5 min, Etanol-10 min, Etanol+Ultrasonido 5 min, Etanol+Ultrasonido 10 min) de tiempo de secado para alcanzar un contenido de humedad del 25% (wb) con corte longitudinal y transversal.

En las muestras de control, el Tc (917.50 ± 12.78 min) necesitó más tiempo que las muestras de Lc (608.02 ± 6.37 min). Esto suena contradictorio con lo reportado en la Tabla 2, donde, aunque con diferencias no significativas, las muestras de Tc mostraron valores más altos de k . Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el valor de k describe el comportamiento inicial del proceso de secado, no el proceso global. De hecho, desde el minuto 300 de secado, ocurrió un cruce entre las curvas de secado de Lc y Tc (Figura 2.A). Por lo tanto, la última etapa de secado fue más rápida en las muestras de Lc, lo que resultó en un menor tiempo requerido para alcanzar una humedad de 0.33 (d.b). Esto se puede explicar por las diferentes contracciones y deformaciones que se producen en las muestras simultáneamente con la pérdida de agua durante el

secado (López-Méndez et al., 2018). De hecho, se observaron efectos de corte significativos en la contracción después del secado, ver sección V.3.

Tabla 3.

Parámetros del modelo de Page de rehidratación. Las letras minúsculas indican prueba de comparación de medias (Tukey con 95% de confianza).

		k1(mind.d.b-1)	k2(d.b-1)	R2	%Var
TC	Control	25.025+2.665 ^{aA}	0.280+0.040 ^{aA}	0.123+0.063	0.993+0.001
	E5	14.955+1.342 ^{bA}	0.196+0.009 ^{bB}	0.227+0.094	0.993+0.002
	E10	14.057+0.992 ^{bA}	0.186+0.013 ^{bB}	0.211+0.102	0.995+0.002
	E+US5	14.740+3.657 ^{bA}	0.201+0.019 ^{bB}	0.221+0.03	0.993+0.002
	E+US10	13.490+0.852 ^{bA}	0.192+0.013 ^{bB}	0.222+0.101	0.994+0.002
Lc	Control	38.457+0.918 ^{aA}	0.173+0.013 ^{aB}	0.144+0.049	0.996+0.002
	E5	28.883+0.377 ^{bA}	0.161+0.002 ^{aB}	0.225+0.037	0.995+0.001
	E10	28.527+2.305 ^{bA}	0.166+0.022 ^{aB}	0.232+0.042	0.995+0.003
	E+US5	28.522+1.973 ^{bA}	0.166+0.017 ^{aB}	0.193+0.099	0.996+0.002
	E+US10	23.972+2.943 ^{bA}	0.1740.0378 ^{aB}	0.348+0.0144	0.992+0.006

El modelo Peleg ajustó con éxito los datos ($R^2 > 0.95$), cuyos parámetros están en la Tabla 3. Los parámetros k_1 es la constante de velocidad de Peleg (relacionada con la inversa de la tasa de absorción de agua) y k_2 es la constante de capacidad de Peleg (relacionada con la inversa del contenido de humedad de equilibrio) (Peleg, 1988). Tanto para k_1 como para k_2 , el tipo de corte y el pretratamiento se vieron afectados significativamente ($p < 0.05$). Sin embargo, solo para k_2 , el tipo de interacción de corte / pretratamiento afectó significativamente (Tabla 3).

En cuanto a k_1 , la tasa de hidratación del corte transversal es casi un 50% más rápida que la del corte longitudinal, como se esperaba. Además, para ambos tipos de cortes, los pretratamientos incrementaron la tasa de rehidratación. Sin embargo, no hay diferencia entre los pretratamientos E-5, E-10, E + US-5 ni E + US-10. Esto muestra que los ultrasonidos no causaron un efecto adicional al pretratamiento con etanol. El pretratamiento con etanol durante 5 min fue suficiente para producir un efecto sobre la rehidratación. De hecho, este pretratamiento aumentó la tasa de rehidratación casi un 78% para el corte transversal y casi un 40% para el corte longitudinal.

Con respecto a k_2 , en comparación con el control, esto se redujo estadísticamente mediante pretratamientos solo para las muestras de Tc. En otras palabras, el pretratamiento aumentó el contenido de humedad de equilibrio de las muestras de Tc en comparación con su respectivo Control. De manera similar a lo observado para el parámetro k_1 , el pretratamiento con etanol durante 5 min fue suficiente para causar una diferencia en k_2 en las

muestras de Tc. Significa que, las modificaciones de la estructura del pretratamiento de etanol permiten que se absorba más agua y también se mantenga en los espacios intercelulares. A pesar del incremento, las muestras no alcanzaron el contenido de humedad *in natura*. Además, el aumento del contenido de humedad de equilibrio por etanol/ultrasonido también se informó en otros trabajos.

V.3. Determinar el impacto de la combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni(etanol) en la estructura y textura

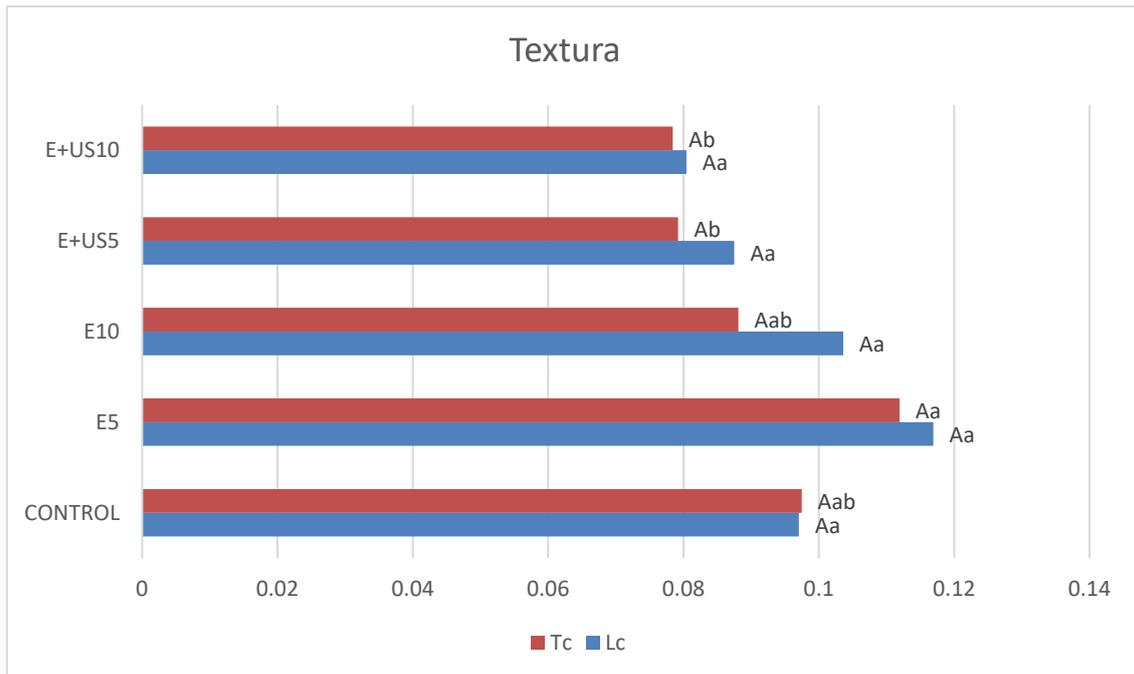
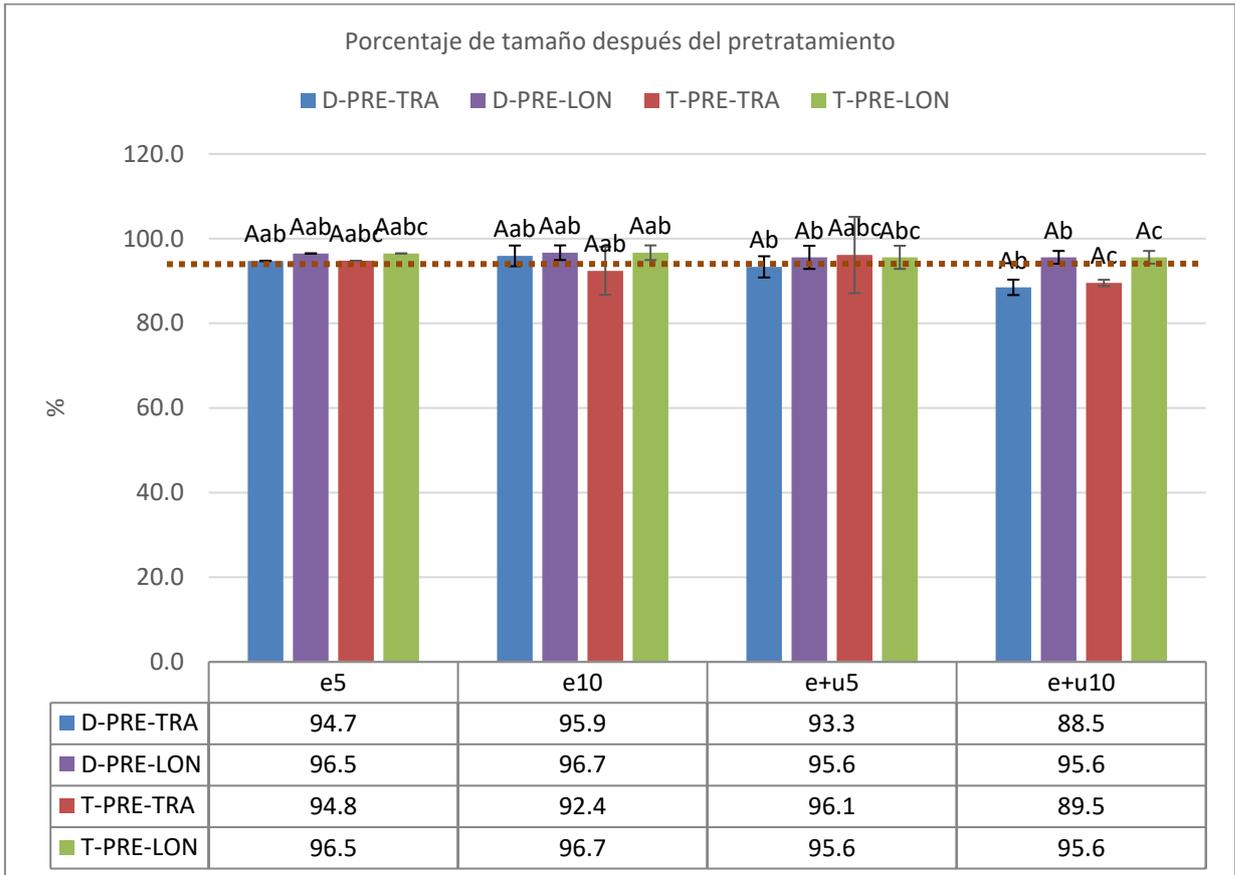


Figura 8. Evaluación de textura de muestras control y pretratadas en corte longitudinal y transversal.

La figura 8 muestra la energía de compresión después de la rehidratación de cada muestra. Este análisis da una idea indirecta si existen diferencias en la microestructura. Hubo diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los pretratamientos, pero no se encontró diferencia significativa entre el tipo de cortes. Para ambos cortes, la energía tendió a ser la más alta para E-5 que los otros tratamientos y tendió a ser la más baja para E + US-10.

a)



b)

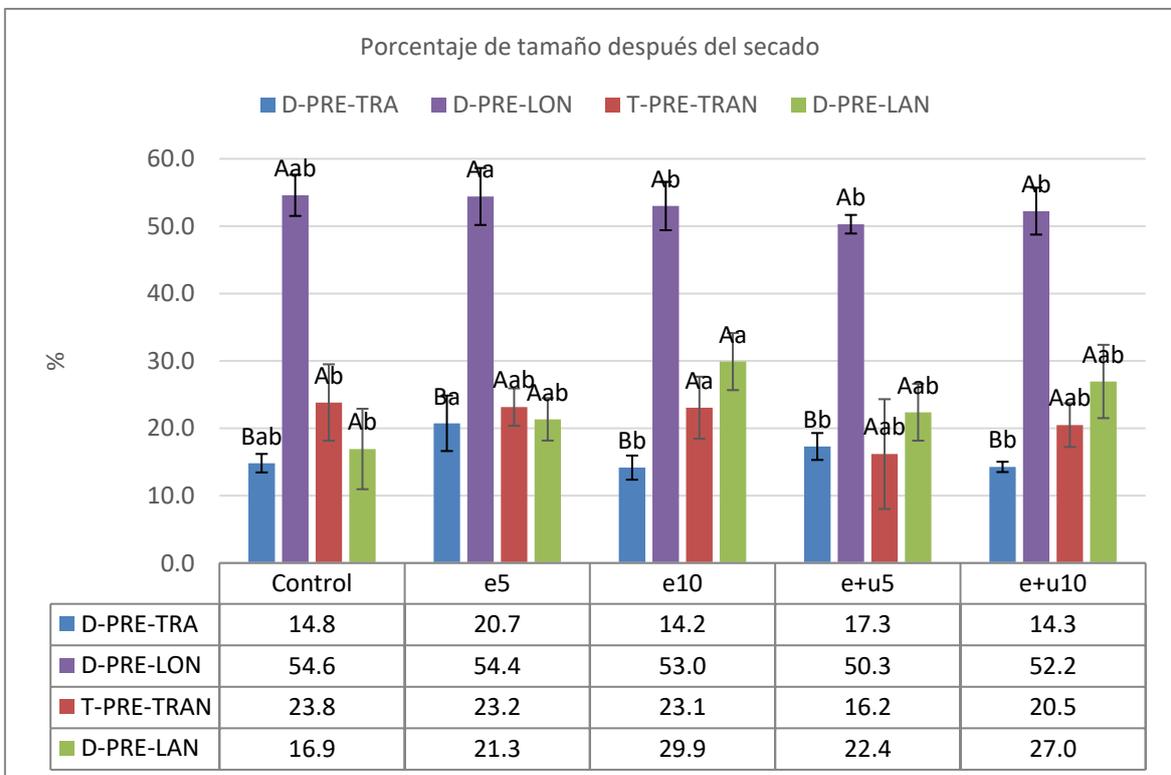


Figura 9. Porcentaje de tamaño de diámetro y espesor entre muestras control y pretratadas en corte longitudinal y transversal.

El porcentaje de conservación de las dimensiones (diámetro (di) y espesor (th)) antes y después del secado, con respecto a las dimensiones originales (1.5 cm de diámetro y 1 cm de espesor) de las muestras se muestran en la Figura 9. Respecto a los resultados posteriores En los pretratamientos (Figura 9a), la contracción del espesor osciló entre el 3.9% y el 10.5%, mientras que la contracción del diámetro osciló entre el 3.3% y el 11.5%. En cuanto al espesor, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el tipo de corte. Sin embargo, los tratamientos previos durante más tiempo (10 min) tienden a aumentar la contracción en el grosor de ambos cortes. En cuanto al diámetro, tampoco hubo diferencias entre el tipo de corte, excepto cuando se aplicó el pretratamiento combinado durante 10 min. Después del pretratamiento con E + US-10, las muestras de Tc se encogieron de diámetro en un porcentaje más alto en comparación con las muestras de Lc.

Las muestras secas pretratadas presentaron diferentes niveles de contracción en comparación con el tamaño original de la muestra (Figura 9,b). Se encontró que los pretratamientos aplicados no afectaron significativamente ($p > 0.05$) la contracción en diámetro o espesor después del secado. Sin embargo, en cuanto al tipo de corte, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el espesor. Todas las muestras de Lc presentan mayor preservación (más del 73%) del espesor en comparación con las muestras de Tc, las cuales alcanzaron hasta un 43% de preservación del espesor.

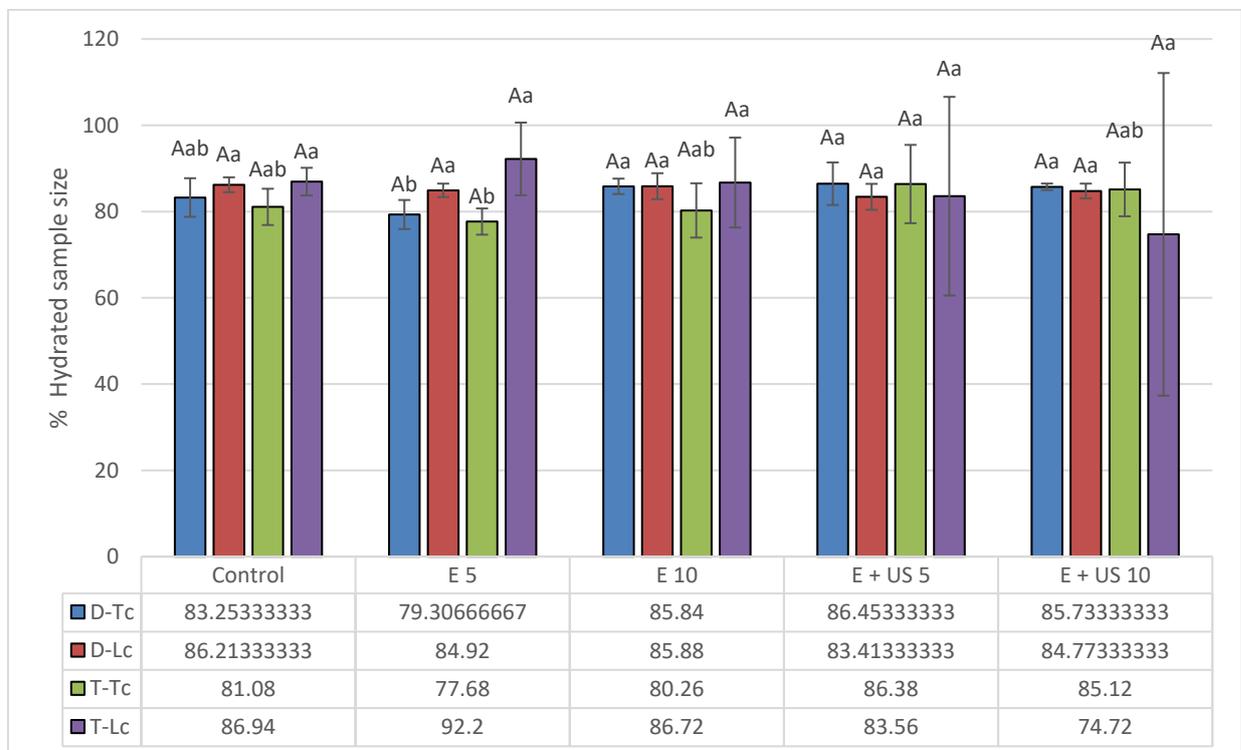


Figura 10. Tamaño de muestra hidratada, porcentaje de diámetro y espesor de muestras control y pretratadas en corte longitudinal y transversal.

La Figura 10 muestra la capacidad de recuperación de los cilindros de núcleo de piña. Este análisis nos da una idea de si los cilindros secos tienen la capacidad de recuperar su tamaño original (espesor y diámetro). No se encontró diferencia estadística entre pretratamientos ni tipo de corte en cuanto a recuperación de espesor. De hecho, el espesor se recuperó alrededor del $83 \pm 3\%$ de su tamaño original. Sin embargo, para el diámetro, hubo efecto interactivo ($p < 0.05$) entre ambas variables, tipo de corte y pretratamientos. En este caso, cuando se aplicó el pretratamiento con E-5, hubo diferencia entre el tipo de corte, siendo el diámetro de Tc menos recuperado que el de Lc.

VI. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

VI.1. Discusión

VI.1.1. Efecto de la estructura, ultrasonido y flujo de Marangoni en los procesos de secado y rehidratación.

Según Luengwilai et al. (2016) el núcleo de la piña está altamente compuesto por haces vasculares (un promedio de 2.83 haces/ mm^2), los cuales están orientados paralelos al eje largo de la fruta. Los haces vasculares presentan un tamaño de 0.18 mm^2 siendo más grandes que los de la región pulpar y están formados por elementos de xilema, capas de floema y capas de fibras de esclerénquima. Los elementos de la xilema están compuestos por células lignificadas ubicadas en el centro de los haces vasculares. El floema consta de células de paredes delgadas que son pequeñas y están ubicadas adyacentes a los elementos de la xilema, mientras que las capas de fibras del esclerénquima rodean los tejidos del floema. Es importante señalar que la estructura del núcleo de la piña difiere de la pulpa. En el caso de la pulpa de la piña, está compuesta por grandes células parenquimáticas con una pared celular delgada que varía de 1.8 a 4.6 μm con el tejido caracterizado por espacios intercelulares difusos en toda la estructura y haces vasculares dispersos en el tejido del parénquima (Rinaldi et al., 2020).

Debido a la estructura mencionada en el núcleo de la piña, al realizar los cortes longitudinales (Lc) y transversales (Tc) en este trabajo, se obtuvieron muestras con diferente orientación de haces vasculares. Las muestras de Lc presentaban sus haces vasculares orientados verticalmente con un tamaño uniforme (1 cm) correspondiente al grosor de los cilindros, mientras que las muestras de Tc presentaban sus haces vasculares orientados horizontalmente por lo tanto con un tamaño variado (≤ 1.5 cm). Por otro lado, el área total que expone el inicio y el final de los haces vasculares en el Lc corresponde al área de las bases de los cilindros (3.53 cm^2) mientras que en el Tc corresponde al área lateral del cilindro (4.71 cm^2). De esta forma, el

número de haces vasculares en las muestras de Tc será mayor que en las de Lc, siendo aproximadamente 500 y 667 haces vasculares, respectivamente.

Por lo tanto, esta estructura se consideró en descripciones posteriores ya que puede influir en el mecanismo de transferencia de fluido durante los pretratamientos y el secado, así como en el nivel de encogimiento del tamaño original durante el secado o la recuperación del tamaño durante la rehidratación.

La Figura 5 representa el Análisis de Componentes Principales (PCA) que asocia los pretratamientos según su efecto sobre las variables dependientes. Al reducirse a 2 dimensiones (Dim 1 y Dim 2), el PCA explicó el 66.5% de las variables dependientes que se vieron afectadas significativamente por los pretratamientos. Además, el PCA muestra una asociación de pretratamientos que tuvo efectos similares en el proceso. Como comentarios principales del análisis de PCA, se encontró:

- ❖ La recuperación del diámetro después de la rehidratación se correlacionó positivamente con k_2 del modelo de Peleg. Esto podría significar que los cilindros recuperan fácilmente el diámetro y absorben más agua (más contenido de humedad de equilibrio). Recordando que el contenido de humedad de equilibrio está relacionado con la inversa de k_2 .
- ❖ La conservación del diámetro después del secado se correlaciona negativamente con la conservación del espesor después del secado. Esto puede significar que los cilindros que conservaron su diámetro en mayor medida conservaron su grosor en menor medida y viceversa.
- ❖ La recuperación del diámetro después de la rehidratación se correlacionó positivamente con la conservación del espesor después del secado. Esto podría significar que los cilindros que conservan mejor su espesor después del secado, tienden a recuperar mejor su diámetro después de la rehidratación.
- ❖ La conservación del diámetro después del secado se correlacionó negativamente con el parámetro k_1 del modelo de Peleg. Esto puede significar que los cilindros con mejor conservación del diámetro después del secado se rehidraten más rápido.
- ❖ Las muestras Lc control y Lc E-5 min son similares en cuanto a mayor valor de k_1 , lo cual se comprobó en el apartado de rehidratación. Por otro lado, Tc control y Tc E-5 min son tratamientos muy divergentes en comparación con los demás.

Esto demostró que a pesar de que el tipo de corte no afectó el proceso de secado, puede afectar otras propiedades del proceso como la rehidratación,

el encogimiento, la textura y la recuperación del tamaño. Además, al realizar algunos pretratamientos (ultrasonidos y etanol), los efectos pueden ser diferentes con respecto al corte de orientación de la muestra. Incluso, la interacción del pretratamiento con la estructura y la composición puede verse influenciada por el corte. Por tanto, este trabajo refuerza la idea de que los alimentos no pueden tratarse como material isotrópico cuando se analizan.

VI.1.2. Influencia de la combinación de tecnologías (ultrasonido y flujo de Marangoni (etanol)) y la orientación del corte en las cinéticas y tiempos de secado y rehidratación

En la figura 5, el mismo resultado también se evidenció en el secado de cortes transversales y longitudinales de calabaza (Rojas & Augusto, 2018c). En comparación con el Control, y para ambos cortes, se observó una diferencia más pronunciada durante el secado de las muestras pretratadas con E + US-10 (Figura 5B y 5C). Esto indica que cuanto mayor sea el tiempo de pretratamiento, mejor será el efecto de la aplicación combinada de etanol y ultrasonido.

La Tabla 2 mostró que todos los tratamientos mostraron un comportamiento subdifusivo ($n < 1$). También se reportó un comportamiento subdifusivo en chips de piña fortificados con hierro pretratados con etanol y ultrasonidos y posterior secado convectivo, donde se atribuyó a la estructura y composición de la pulpa de piña, lo que dificulta el proceso de secado (Carvalho, Rojas, et al., 2020). Por el contrario, Rani y Tripathy (2019) informaron $n > 1$ para las rodajas de pulpa de piña de control y pretratadas con ultrasonido (durante 20 y 30 min), siendo mayor en las muestras con un tiempo de pretratamiento más prolongado (30 min). Esta diferencia probablemente se debió a la variedad de piña utilizada y su estructura y composición inherentes.

Además, no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$) para n y k entre los pretratamientos y entre los tipos de cortes (Tabla 2). Indica que los efectos del tipo de cortes, y pretratamientos no fueron suficientes para mostrar cambios significativos en la inclinación de las curvas en la etapa de secado inicial (valor de k) así como en la estructura y mecanismos de transferencia de masa (valor de n). De hecho, esto puede deberse a dos posibilidades: el tiempo de pretratamiento insuficiente y la interacción del etanol con los compuestos del núcleo de la piña, lo que probablemente dificulta la visualización de efectos significativos sobre los parámetros cinéticos. Los antecedentes que respaldan estas posibilidades se describen a continuación.

Por un lado, se informó que el etanol promueve la deshidratación por efecto osmótico, modificaciones estructurales de la superficie de la muestra y efecto Marangoni. Los dos primeros efectos se producen durante el pretratamiento

y el último durante la primera etapa de secado. Durante los pretratamientos de etanol, se ha reportado que a mayor tiempo de aplicación, se intensifican la pérdida de agua y sólidos y la ganancia de etanol, así como los efectos estructurales (Guedes et al., 2021; Rojas & Augusto, 2018b; K. C. Santos et al., 2020; Wang et al., 2019). Donde el tiempo de pretratamiento adecuado depende de las propiedades intrínsecas de la materia prima y del tipo de método de secado. Por ejemplo, durante el secado por convección, en productos como la papa (Guedes et al., 2021) y la zanahoria (K. C. Santos et al., 2020), fueron necesarios 30 min de pretratamiento para observar cambios significativos en los parámetros k y n . Mientras que en calabaza fueron necesarios más de 10 min de procesamiento (Rojas & Augusto, 2018b; M. L. Rojas et al., 2020), ya que a los 5 min no se observaron diferencias (Carvalho, Massarioli, et al., 2020), también en este pretratamiento En el tiempo se evidenciaron efectos bajos para el fruto del cambuci (Rojas et al., 2021).

Por otro lado, el pretratamiento por ultrasonidos aumenta la transferencia de agua durante el secado debido a cambios inducidos en la estructura de las muestras. Cuando se aplica el ultrasonido por períodos cortos, se producen pocos cambios micro estructurales (Miano et al., 2019). Por el contrario, el uso de ultrasonidos durante períodos prolongados puede reducir la resistencia al flujo de agua mediante la formación de microcanales, que mejoran la migración de la humedad (Feng et al., 2019; Rani & Tripathy, 2019). Sin embargo, en función del tiempo de pretratamiento, la muestra también puede perder algunos compuestos y normalmente la formación de microcanales se intensifica con un tiempo de pretratamiento más prolongado.

En corazón de piña no se ha estudiado el pretratamiento con ultrasonidos ni con etanol. Sin embargo, estos pretratamientos ya se han aplicado como pretratamiento en el secado de pulpa. Al respecto, en rodajas de piña, el uso de pretratamiento con ultrasonidos promovió la pérdida de azúcares en un 23.2% a los 30 minutos debido a la diferente presión osmótica entre la fruta y el medio líquido (agua destilada) (Fernandes, Linhares Jr, et al., 2008). Además, en el mismo tiempo de procesamiento, se informó que el pretratamiento con ultrasonido provocaba que las células se volvieran más distorsionadas con formación de canales microscópicos, con el consecuente aumento de la difusividad del agua (Fernandes et al., 2009; Fernandes, Linhares Jr, et al., 2008). Además, se ha encontrado que 20 min de pretratamiento con ultrasonidos aceleraron significativamente el proceso de secado por convección de muestras de pulpa de piña (Corrêa et al., 2017).

En cuanto a la aplicación combinada de etanol y ultrasonido, se requirió un tiempo de pretratamiento superior a 15 min para incrementar

significativamente el valor k . Esto se observó previamente en calabaza (M. L. Rojas et al., 2020) y zanahoria (K. C. Santos et al., 2020) durante el secado convectivo. Además, se ha estudiado el efecto del pretratamiento combinado de ultrasonido y etanol sobre el secado por convección de muestras de pulpa de piña, encontrando que a medida que aumenta el tiempo de procesamiento (de 7.5 min a 30 min), el valor de k aumenta significativamente (Carvalho, Rojas, et al., 2020).

Por tanto, los efectos del ultrasonido y/o del etanol dependen del tipo de producto y del tiempo de pretratamiento. Debido a que este es el primer trabajo en un tipo de producto como el corazón de piña, se recomienda explorar otras condiciones de pretratamiento (> 10 min) para mostrar mayores efectos sobre los parámetros cinéticos k y n .

Interacción del etanol con los compuestos del núcleo de la piña

El efecto del etanol podría verse afectado por su reacción con sustancias liberadas por las muestras de núcleo de piña. En particular, la proteína bromelina, que se encuentra en la piña, puede precipitar en contacto con el etanol. Por ejemplo, el etanol se usa para la recuperación de bromelina (Soares et al., 2012), mientras que específicamente en el núcleo, el etanol tenía un 32.5% de estabilidad operacional con bromelina entrecruzada (Banerjee et al., 2020). De la misma forma, los haces vasculares de la piña tienen una alta actividad polifenol oxidasa (Luengwilai et al., 2016). Al respecto, se demostró que el etanol con una concentración superior al 70%(v/v) logra una desactivación completa e irrecuperable de la polifenol oxidasa (Maimaiti et al., 2020). Además, en el núcleo de la piña el contenido total de carbohidratos es del 77.8%, donde entre los monosacáridos, la galactosa es el azúcar principal en el núcleo de la piña (Hadidi et al., 2020). Estos carbohidratos podrían haber sufrido ciertas modificaciones al interactuar con el etanol durante los tratamientos. De hecho, la solubilidad de la galactosa disminuye notablemente a medida que aumenta la fracción de masa de etanol y la temperatura (Montañés et al., 2007).

Por lo tanto, las interacciones entre el etanol y las enzimas y / o carbohidratos pueden ocurrir durante el pretratamiento debido al contacto del etanol con la muestra y luego probablemente también durante la etapa inicial del proceso de secado debido al etanol residual en las muestras. Sin embargo, el efecto de la precipitación de enzimas y / o carbohidratos sobre el comportamiento de secado dependerá del tiempo de pretratamiento. En tiempos breves, los precipitados pueden depositarse en los haces vasculares dificultando el secado, mientras que en tiempos de pretratamiento más largos puede producirse un efecto de "lavado" en las muestras, que puede intensificarse con la aplicación de ultrasonidos.

Finalmente, una vez más, se confirma que el efecto de los pretratamientos con etanol y / o ultrasonidos sobre los valores k y n obtenidos dependen de varios factores, entre ellos la estructura interna y composición de la materia prima, las condiciones de aplicación del pretratamiento, y el método de secado.

La Figura 7 muestra el tiempo de secado que necesitaron las muestras para alcanzar una humedad de 0.33 (d.b). Este nivel de humedad ha sido definido con fines de comparación entre pretratamientos, además, se considera como una referencia del nivel máximo que deben contener los productos de baja humedad (Jay et al., 2005).

En las muestras de control, el T_c (917.50 ± 12.78 min) necesitó más tiempo que las muestras de L_c (608.02 ± 6.37 min). Esto suena contradictorio con lo reportado en la Tabla 1, donde, aunque con diferencias no significativas, las muestras de T_c mostraron valores más altos de k . Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el valor de k describe el comportamiento inicial del proceso de secado, no el proceso global. De hecho, desde el minuto 300 de secado, ocurrió un cruce entre las curvas de secado de L_c y T_c (Figura 7.A). Por lo tanto, la última etapa de secado fue más rápida en las muestras de L_c , lo que resultó en un menor tiempo requerido para alcanzar una humedad de 0.33 (d.b). Esto se puede explicar por las diferentes contracciones y deformaciones que se producen en las muestras simultáneamente con la pérdida de agua durante el secado (López-Méndez et al., 2018). De hecho, se observaron efectos de corte significativos en la contracción después del secado.

Por otro lado, cuando se aplicaron pretratamientos, el tiempo de secado de cada tipo de corte presentó un comportamiento contrario al observado para las muestras Control (Figura 7). Cuando las muestras se sumergieron durante 5 min en etanol (E-5), el tiempo de secado fue significativamente ($p < 0.05$) más largo en las muestras de L_c , en comparación con las muestras de T_c . Este comportamiento entre cortes se mantuvo para todos los pretratamientos. En las muestras de L_c , en comparación con el pretratamiento con E-5, el pretratamiento con etanol más prolongado (10 min) y la aplicación de ultrasonidos redujeron el tiempo de secado requerido. Esto podría explicarse por tiempos más prolongados de etanol o la aplicación de ultrasonidos mejora el efecto de “lavado” de compuestos que podrían dificultar el secado en el pretratamiento con E-5. Sin embargo, para estos pretratamientos en muestras de L_c , no se observó una reducción significativa ($p > 0.05$) en el tiempo de secado requerido por el Control.

Por el contrario, en comparación con el Control, se requirieron tiempos significativamente más cortos para todas las muestras de T_c pretratadas. Se ha demostrado que los elementos vasculares juegan un papel importante en

el proceso de transferencia de agua, que actúan como capilares (Rojas & Augusto, 2018c; Tyree & Zimmermann, 2002). Por lo tanto, dado que las muestras de Tc presentaron una mayor área conteniendo más haces vasculares expuestos a pretratamientos y al aire de secado, requirió un tiempo de secado corto. En este tipo de corte, el pretratamiento E+US-10 permitió reducir el tiempo de secado del control en un 60%. Esto podría ser el resultado de los efectos positivos de la orientación de los elementos vasculares en las muestras de Tc y la aplicación combinada de etanol y ultrasonido durante 10 min, donde el efecto de esponja inducido por ultrasonido intensificó los efectos del etanol. Hasta ahora, el uso combinado de ultrasonido y etanol ha logrado un efecto positivo al disminuir el tiempo de secado convencional en rodajas de ajo (Feng et al., 2019), en cebollín (Wang et al., 2019), en rodajas de manzana (Zubernik et al., 2019) y cilindros de piña (Carvalho, Rojas, et al., 2020). Además, aunque se ha estudiado poco el efecto del tipo de orientación del corte sobre el tiempo de secado, Ren et al. (2021) informó, para el secado convectivo de jengibre, el tiempo de secado en las muestras de corte longitudinal (análogo al corte transversal en el presente estudio) fue 20% menor que el tiempo de secado en las muestras de corte transversal.

En resumen, cuando el pretratamiento es corto y solo con etanol (E-5), el estado estructural de las muestras de Lc conduce a una posible interacción con azúcar y proteínas formando precipitados y luego bloqueando los haces vasculares. Sin embargo, cuando un tiempo de pretratamiento más prolongado y / o el uso de ultrasonidos (pretratamientos E-10, E + US-5 y E + US-10), pueden ayudar a desbloquear los poros. Por lo tanto, el tiempo de secado requerido podría ser el resultado del equilibrio entre la interacción entre el etanol y los compuestos de la muestra, y las características (longitud y orientación) de los haces vasculares de cada tipo de corte, que en un corto tiempo de pretratamiento perjudicaron el secado en mayor medida en las muestras de Lc. No obstante, los estudios futuros podrían centrarse en los mecanismos entre el etanol y los compuestos internos del núcleo de la piña durante el pretratamiento y el secado.

La Figura 6 muestra el contenido de humedad durante la rehidratación de las muestras de núcleo de piña comparando cortes controles (Figura 5a), transversales (Figura 6b) y longitudinales (Figura 6c), bajo las mismas condiciones operativas. A diferencia de los resultados del secado, la cinética de rehidratación se vio afectada por el tipo de corte. Según la Figura 5a, al inicio del proceso, parece que el corte transversal (Tc) se rehidrata más rápido que el corte longitudinal (Lc). Sin embargo, las muestras de Lc alcanzaron un contenido de humedad de equilibrio más alto (aproximadamente un 12% más) que el Tc. Este mismo comportamiento (cruce de cinética de rehidratación) se encontró para muestras de calabaza

con cortes de tipo análogo (Rojas & Augusto, 2018c), pero no para la raíz de yacón (De Los Santos et al., 2021). Esto demuestra que el tipo de materia prima y elementos estructurales conducirán a un efecto diferente en el proceso de rehidratación y esto justifica la necesidad de realizar más estudios de las condiciones de cada material alimenticio para conocer su comportamiento.

La primera etapa de rehidratación puede ser principalmente por capilaridad ya que el agua intentaría llenar los poros y canales vacíos expuestos (Rojas & Augusto, 2018c). Esta transferencia de agua inicial puede verse afectada por la tortuosidad, el tamaño (Cai & Yu, 2011) y la cantidad de haces vasculares y / o sólidos que bloquean o adhieren los poros. Como se describe en la sección 3.1, las muestras de Lc tendrían menos haces vasculares cuyas aberturas están en el área de la base, y las muestras de Tc tendrían más haces vasculares cuyas aberturas están en el área lateral; por lo tanto, Tc tiene más canales abiertos que los cilindros Lc. Esto podría explicar por qué la rehidratación es más rápida para el corte de Tc que para el de Lc durante las primeras 2 h del proceso.

Con respecto al contenido de humedad de equilibrio, como se indicó, las muestras de Lc absorben más agua que las muestras de Tc. De hecho, los haces vasculares son paralelos al espesor del cilindro para las muestras de Lc, cuyos canales no se contrajeron severamente durante el secado (Figura 8b). Esto mantuvo los haces vasculares lo más rectos posible, con poca tortuosidad, permitiendo que el agua se transfiriera mejor al resto de tejidos. Por otro lado, los haces vasculares de las muestras de Tc podrían colapsar durante el secado debido a que su orientación podría formar canales tortuosos. Así, esto dificultaba la transferencia de agua a otros tejidos y la recuperación del tamaño original.

Por tanto, lo anterior indica que, aunque las muestras de Lc absorben agua lentamente, el agua absorbida en este tipo de cortes se distribuye y retiene mejor en los tejidos adyacentes de los haces vasculares.

Por otro lado, las Figuras 6b y 6c sugieren que los pretratamientos mejoraron la rehidratación de Tc más que Lc. Esto evidencia la importancia de considerar el tipo de corte cuando se estudia un enfoque.

Para un estudio detallado de la cinética de rehidratación, el modelo de Peleg se ajustó a los datos para explicar una mejor tasa de rehidratación y el agua máxima absorbida. Este modelo ajustó con éxito los datos ($R_2 > 0.95$), cuyos parámetros están en la Tabla 2. Los parámetros k_1 es la constante de velocidad de Peleg (relacionada con la inversa de la tasa de absorción de agua) y k_2 es la constante de capacidad de Peleg (relacionada con la inversa del contenido de humedad de equilibrio) (Peleg, 1988). Tanto para k_1 como

para k_2 , el tipo de corte y el pretratamiento se vieron afectados significativamente ($p < 0.05$). Sin embargo, solo para k_2 , el tipo de interacción de corte / pretratamiento afectó significativamente (Tabla 2).

En cuanto a k_1 , la tasa de hidratación del corte transversal es casi un 50% más rápida que la del corte longitudinal, como se esperaba. Además, para ambos tipos de cortes, los pretratamientos incrementaron la tasa de rehidratación. Sin embargo, no hay diferencia entre los pretratamientos E-5, E-10, E + US-5 ni E + US-10. Esto muestra que los ultrasonidos no causaron un efecto adicional al pretratamiento con etanol. El pretratamiento con etanol durante 5 min fue suficiente para producir un efecto sobre la rehidratación. De hecho, este pretratamiento aumentó la tasa de rehidratación casi un 78% para el corte transversal y casi un 40% para el corte longitudinal. De hecho, el etanol puede conducir a paredes celulares delgadas aumentando su permeabilidad (N. C. Santos et al., 2020), aumentando los espacios intercelulares. Esto podría provocar la aceleración de la transferencia de agua al comienzo del proceso de rehidratación, lo que explica los valores bajos de k_1 .

Con respecto a k_2 , en comparación con el control, esto se redujo estadísticamente mediante pretratamientos solo para las muestras de Tc. En otras palabras, el pretratamiento aumentó el contenido de humedad de equilibrio de las muestras de Tc en comparación con su respectivo control. De manera similar a lo observado para el parámetro k_1 , el pretratamiento con etanol durante 5 min fue suficiente para causar una diferencia en k_2 en las muestras de Tc. Significa que, las modificaciones de la estructura del pretratamiento de etanol permiten que se absorba más agua y también se mantenga en los espacios intercelulares. A pesar del incremento, las muestras no alcanzaron el contenido de humedad *in natura*. Además, el aumento del contenido de humedad de equilibrio por etanol/ultrasonido también se informó en otros trabajos. Por ejemplo, el uso de etanol aumenta la humedad de equilibrio de la calabaza (Carvalho, Massarioli, et al., 2020; Rojas & Augusto, 2018c). Incluso, investigaciones anteriores reportaron un mayor contenido de humedad que las muestras crudas, en manzana (Funebo et al., 2002; M. L. Rojas et al., 2020) y cebolleta (Wang et al., 2019).

VI.1.3. Contracción después de los pretratamientos y después del secado

El porcentaje de conservación de las dimensiones (diámetro (di) y espesor (th)) antes y después del secado, con respecto a las dimensiones originales (1.5 cm de diámetro y 1 cm de espesor) de las muestras se muestran en la Figura 4. Respecto a los resultados posteriores en los pretratamientos (Figura 4a), la contracción del espesor osciló entre el 3.9% y el 10.5%, mientras que la contracción del diámetro osciló entre el 3.3% y el 11.5%. En

cuanto al espesor, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el tipo de corte. Sin embargo, los tratamientos previos durante más tiempo (10 min) tienden a aumentar la contracción en el grosor de ambos cortes. En cuanto al diámetro, tampoco hubo diferencias entre el tipo de corte, excepto cuando se aplicó el pretratamiento combinado durante 10 min. Después del pretratamiento con E+US-10, las muestras de Tc se encogieron de diámetro en un porcentaje más alto en comparación con las muestras de Lc. Se sabe que los haces vasculares, además de la función de transporte de fluidos, proporcionan soporte mecánico a las estructuras de las plantas (Dickison, 2000). Esto refleja que la heterogeneidad en el tamaño de los haces vasculares en las muestras de Tc no proporciona un soporte adecuado para mantener sus dimensiones originales después del pretratamiento con E+US-10.

Las muestras secas pretratadas presentaron diferentes niveles de contracción en comparación con el tamaño original de la muestra (Figura 4.b). Se encontró que los pretratamientos aplicados no afectaron significativamente ($p > 0.05$) la contracción en diámetro o espesor después del secado. Sin embargo, en cuanto al tipo de corte, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el espesor. Todas las muestras de Lc presentan mayor preservación (más del 73%) del espesor en comparación con las muestras de Tc, las cuales alcanzaron hasta un 43% de preservación del espesor. Esto tiene sentido ya que en las muestras de Lc los haces vasculares están orientados paralelos a su espesor, proporcionando así el soporte mecánico necesario evitando elevadas deformaciones en esta dimensión.

En cuanto a la contracción del diámetro después del secado, se observaron diferencias significativas entre los cortes solo cuando los pretratamientos se aplicaron durante 5 min. Sin embargo, en todos los casos las muestras de Tc tienden a conservar mejor el diámetro (más del 53%) en comparación con las muestras de Lc, que alcanzan una conservación del diámetro de hasta el 50%. Esto se debe a que en las muestras de Tc sus haces vasculares están orientados paralelos a su diámetro, proporcionando así el soporte mecánico necesario para preservarlo. Resultados similares fueron reportados por Rojas y Augusto (2018c), donde dependiendo del tipo de corte, la orientación paralela de los haces vasculares a una determinada dimensión proporciona soporte mecánico evitando su deformación.

Finalmente, es importante notar que el porcentaje de preservación del espesor en las muestras de Lc fue mucho mayor que el porcentaje de preservación del diámetro en las muestras de Tc. Esto indica que, aunque las muestras de Tc han conservado mejor el diámetro en comparación con

las muestras de Lc, la longitud de los haces vasculares se conservó mejor (con baja tortuosidad) en las muestras de Lc.

Por tanto, los resultados sugieren que el escaso nivel de retracción detectado tras la aplicación de los pretratamientos, tras el secado, no es importante ya que es la orientación de corte la que tiene mayor impacto en la retracción. En consecuencia, se pueden aplicar pretratamientos para mejorar el proceso sin contribuir a una mayor contracción en las muestras secas.

VI.1.4. Impacto de la combinación del ultrasonido con el flujo de Marangoni en la estructura y textura

Textura (energía de compresión)

La figura 8 muestra la energía de compresión después de la rehidratación de cada muestra. La posible explicación de esto es que a medida que el etanol aumenta la permeabilidad de la pared celular, permite que entre más agua a las células. Por lo tanto, las células se vuelven más turgentes, lo que genera una resistencia adicional a las compresiones. Sin embargo, en tiempos de procesamiento más largos con etanol, aunque se mejora la toma de agua, las modificaciones provocadas en la estructura hacen que se colapse más fácilmente al aplicar una determinada fuerza de compresión. Por otro lado, cuando se usó ultrasonido, esta tecnología podría causar alguna interrupción estructural (Miano et al., 2019), especialmente cuando se usa durante 10 min. Sin embargo, en cualquier caso, los niveles de energía en las muestras pretratadas se mantuvieron similares a los de las muestras de control.

Cabe mencionar que el efecto del etanol sobre la textura de los alimentos dependería de las condiciones de pretratamiento y del alimento. Por ejemplo, el trabajo de (Rojas & Augusto, 2018b) mostró una ligera reducción del módulo de elasticidad relacionado con los componentes intercelulares, pero no un cambio en la elasticidad de la pared celular. Sin embargo, ese trabajo sumergió las muestras en etanol durante 1 hora y se aplicó a calabaza. Por tanto, parece que debería existir un tiempo de pretratamiento óptimo para mejorar el proceso de secado / rehidratación, minimizando los efectos de textura.

Encogimiento (contracción de la muestra)

En cuanto al espesor, no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el tipo de corte. Sin embargo, los tratamientos previos durante más tiempo (10 min) tienden a aumentar la contracción en el grosor de ambos cortes. En cuanto al diámetro, tampoco hubo diferencias entre el tipo de corte, excepto cuando se aplicó el pretratamiento combinado durante 10 min. Después del pretratamiento con E + US-10, las muestras de Tc se encogieron de diámetro en un porcentaje más alto en comparación con las muestras de Lc. Se sabe que los haces vasculares, además de la función de transporte de fluidos,

proporcionan soporte mecánico a las estructuras de las plantas (Dickison, 2000). Esto refleja que la heterogeneidad en el tamaño de los haces vasculares en las muestras de Tc no proporciona un soporte adecuado para mantener sus dimensiones originales después del pretratamiento con E + US-10.

Las muestras secas pretratadas presentaron diferentes niveles de contracción en comparación con el tamaño original de la muestra (Figura 9.b). Se encontró que los pretratamientos aplicados no afectaron significativamente ($p > 0.05$) la contracción en diámetro o espesor después del secado. Sin embargo, en cuanto al tipo de corte, se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el espesor. Todas las muestras de Lc presentan mayor preservación (más del 73%) del espesor en comparación con las muestras de Tc, las cuales alcanzaron hasta un 43% de preservación del espesor. Esto tiene sentido ya que en las muestras de Lc los haces vasculares están orientados paralelos a su espesor, proporcionando así el soporte mecánico necesario evitando elevadas deformaciones en esta dimensión.

En cuanto a la contracción del diámetro después del secado, se observaron diferencias significativas entre los cortes solo cuando los pretratamientos se aplicaron durante 5 min. Sin embargo, en todos los casos las muestras de Tc tienden a conservar mejor el diámetro (más del 53%) en comparación con las muestras de Lc, que alcanzan una conservación del diámetro de hasta el 50%. Esto se debe a que en las muestras de Tc sus haces vasculares están orientados paralelos a su diámetro, proporcionando así el soporte mecánico necesario para preservarlo. Resultados similares fueron reportados por Rojas y Augusto (2018c), donde dependiendo del tipo de corte, la orientación paralela de los haces vasculares a una determinada dimensión proporciona soporte mecánico evitando su deformación.

Finalmente, es importante notar que el porcentaje de preservación del espesor en las muestras de Lc fue mucho mayor que el porcentaje de preservación del diámetro en las muestras de Tc. Esto indica que, aunque las muestras de Tc han conservado mejor el diámetro en comparación con las muestras de Lc, la longitud de los haces vasculares se conservó mejor (con baja tortuosidad) en las muestras de Lc.

Por tanto, los resultados sugieren que el escaso nivel de retracción detectado tras la aplicación de los pretratamientos, tras el secado, no es importante ya que es la orientación de corte la que tiene mayor impacto en la retracción. En consecuencia, se pueden aplicar pretratamientos para mejorar el proceso sin contribuir a una mayor contracción en las muestras secas.

Recuperación de tamaño luego de rehidratación

La Figura 10 muestra la capacidad de recuperación de los cilindros de núcleo de piña. Este análisis nos da una idea de si los cilindros secos tienen la capacidad de recuperar su tamaño original (espesor y diámetro). No se encontró diferencia estadística entre pretratamientos ni tipo de corte en cuanto a recuperación de espesor. De hecho, el espesor se recuperó alrededor del $83 \pm 3\%$ de su tamaño original. Sin embargo, para el diámetro, hubo efecto interactivo ($p < 0.05$) entre ambas variables, tipo de corte y pretratamientos. En este caso, cuando se aplicó el pretratamiento con E-5, hubo diferencia entre el tipo de corte, siendo el diámetro de Tc menos recuperado que el de Lc. Quizás en esta condición tuvo lugar una interacción entre el etanol, la estructura y la composición, que debería estudiarse en estudios futuros.

Es importante mencionar que a pesar de que la recuperación del tamaño final fue ligeramente diferente, la velocidad de recuperación puede ser diferente para cada tipo de corte. Esto se demostró para la calabaza (Rojas & Augusto, 2018c), que se observó, mediante imágenes, diferente velocidad de recuperación, pero similar tamaño final. Este es un punto interesante para futuros estudios del proceso de rehidratación.

VI.2. Conclusiones

VI.2.1. Tanto los pretratamientos como los tipos de cortes afectaron en mayor o menor intensidad a los diferentes parámetros evaluados. 66.5% de las variables dependientes que se vieron afectadas significativamente por los pretratamientos. Además, el PCA muestra una asociación de pretratamientos que tuvo efectos similares en el proceso. El tipo de corte no afectó el proceso de secado, puede afectar otras propiedades del proceso como la rehidratación, el encogimiento, la textura y la recuperación del tamaño. Además, al realizar algunos pretratamientos (ultrasonidos y etanol), los efectos pueden ser diferentes con respecto al corte de orientación de la muestra. Incluso, la interacción del pretratamiento con la estructura y la composición puede verse influenciada por el corte. Por tanto, este trabajo refuerza la idea de que los alimentos no pueden tratarse como material isotrópico cuando se analizan.

VI.2.2. El comportamiento de la cinética de secado no se vio afectado ni por el tipo de corte ni por los pretratamientos aplicados. Los parámetros del modelo de Page tampoco mostraron cambios significativos. Sin embargo, cuando se aplicó el etanol combinado con pretratamiento por ultrasonidos durante 10 min en muestras de Tc, el tiempo de secado se redujo hasta en un 60%. Estos resultados en el proceso de secado se explican por los efectos del etanol y los ultrasonidos en la estructura y composición, que eran diferentes en

cada tipo de corte y dependían del tiempo de pretratamiento. El comportamiento de rehidratación estuvo influenciado por el nivel de contracción después del secado y por la orientación de los haces vasculares, donde las muestras de Tc mostraron mayor tasa de rehidratación mientras que las muestras de Lc mostraron mayor retención de agua. Además, los pretratamientos mejoraron las propiedades de rehidratación; sin embargo, la aplicación de ultrasonidos no produjo un efecto adicional sobre el etanol.

VI.2.3. En cuanto a la contracción, la aplicación de pretratamientos redujo ligeramente el diámetro y el espesor sin efectos significativos del tipo de corte, salvo pretratamientos más largos y combinados. Después del secado, con respecto a las dimensiones originales de la muestra, las muestras de Tc conservan su diámetro en un nivel superior, ya que los haces vasculares eran paralelos al diámetro que confieren soporte mecánico. Por el contrario, las muestras de Lc conservan mejor su grosor, lo que también se explica por la orientación de los haces vasculares. En cuanto a la recuperación de dimensiones lograda tras la rehidratación, no se evidenciaron efectos ni del tipo de corte ni de los pretratamientos en la recuperación de espesor, contrario a lo observado en la recuperación de diámetro. La energía de compresión después de la rehidratación no se vio influenciada por el tipo de corte y permaneció similar al Control en las muestras pretratadas.

VI.3. Recomendaciones

VI.3.1. Los resultados encontrados promueven futuros estudios que podrían centrarse en los mecanismos y la acción y reacción entre el etanol y las proteínas internas de la piña durante el secado y la rehidratación. La influencia de la orientación del corte debe compararse entre diferentes productos con el uso de ultrasonidos y etanol. El control de los parámetros y las condiciones del ultrasonido, el efecto Marangoni, la muestra y el estado del producto final se pueden tomar en consideración para futuras investigaciones.

VI.3.2. Aunque el Tc requirió un mayor tiempo de secado convectivo convencional, la orientación del corte y la distribución de sus haces vasculares más largos reaccionaron mejor con los pretratamientos en comparación con el Lc. Los pretratamientos cortos con etanol (E5) bloquearon los poros y los haces vasculares en la interacción con el azúcar y las proteínas precipitadas, requirieron la adición de ultrasonido para lavar y promover el secado en Lc. Sin embargo, para la contracción, Lc al tener elementos vasculares cortos

orientados verticalmente, conserva mejor el espesor y diámetro originales evitando así una mayor deformación. Por otro lado, la orientación del corte no mostró influencia en la rehidratación y textura. Esto podría sugerir que la combinación de ambos tratamientos probablemente modificó la estructura después del secado haciendo coincidir la geometría de los haces vasculares de ambos cortes. Aun así, entre los tratamientos previos, el etanol muestra un patrón más claro, mientras que la ecografía a veces tiene resultados aleatorios. Se recomendaría el uso de un corte transversal con un tratamiento combinado de etanol y ultrasonido durante 10 min para obtener una reducción significativa del tiempo de secado.

VI.3.3. Debido a que en la recuperación de dimensiones después de la rehidratación y la energía de compresión no se evidenciaron efectos ni del tipo de corte ni de los pretratamientos en la recuperación de espesor, contrario a lo observado en la recuperación de diámetro, se debe estudiar si se presenta el mismo efecto en diferentes materias primas para verificar si se comparte el mismo patrón para conocer su mecanismo y además enfocarse en mejoras de estudios de recuperación de diámetro de las muestras.

Lista de referencias

- Aguirre, M. A., & Miano, A. C. Acelerando la deshidratación de Arándanos (*Vaccinium Corymbosum*) empleando el efecto de Marangoni Accelerating blueberry dehydration by Marangoni effect.
- Ahmed, J., Ramaswamy, H. S., Kasapis, S., & Boye, J. I. (2016). *Novel food processing: effects on rheological and functional properties*. CRC Press.
- Amanor-Atiemoh, R., Zhou, C., Abdullaleef Taiye, M., Sarpong, F., Wahia, H., Amoa-Owusu, A., . . . Chen, L. (2020). Effect of ultrasound-ethanol pretreatment on drying kinetics, quality parameters, functional group, and amino acid profile of apple slices using pulsed vacuum drying. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2), e13347.
- Arkhangel'skii, M., & ARKHANGEL'SKII, M. (1973). Diffusion in heterogeneous systems.
- Banerjee, S., Arora, A., Vijayaraghavan, R., & Patti, A. F. (2020). Extraction and crosslinking of bromelain aggregates for improved stability and reusability from pineapple processing waste. *International journal of biological macromolecules*, 158, 318-326.
- Başlar, M., Toker, Ö. S., Karasu, S., Tekin, Z. H., & Yildirim, H. B. (2015). Ultrasonic Applications for Food Dehydration.
- Beck, S. M., Sabarez, H., Gaukel, V., & Knoerzer, K. (2014). Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound—a response surface approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(6), 2144-2150.

- Behera, G., & Sutar, P. P. (2018). Effect of convective, infrared and microwave heating on drying rates, mass transfer characteristics, milling quality and microstructure of steam gelatinized Paddy. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8), e12900.
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar energy*, 85(8), 1665-1691.
- Bennamoun, L., & Li, J. (2018). Drying process of food: fundamental aspects and mathematical modeling. In *Natural and artificial flavoring agents and food dyes* (pp. 29-82). Elsevier.
- Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology*. Academic press.
- Bird, R. B. (2002). Transport phenomena. *Appl. Mech. Rev.*, 55(1), R1-R4.
- Biswas, N., & Manna, N. K. (2018). Magneto-hydrodynamic Marangoni flow in bottom-heated lid-driven cavity. *Journal of Molecular Liquids*, 251, 249-266.
- Borisov, Y., & YA, B. Y. (1973). Acoustic drying.
- Braga, A., Pedroso, M., Augusto, F., & Silva, M. (2009). Volatiles identification in pineapple submitted to drying in an ethanolic atmosphere. *Drying Technology*, 27(2), 248-257.
- Bush, J. (2014). 18.357 Interfacial Phenomena, Fall 2010. In.
- Cai, J., & Yu, B. (2011). A discussion of the effect of tortuosity on the capillary imbibition in porous media. *Transport in porous media*, 89(2), 251-263.
- Carvalho, G. R., Massarioli, A. P., Alvim, I. D., & Augusto, P. E. D. (2020). Iron-Fortified Pineapple Chips Produced Using Microencapsulation, Ethanol, Ultrasound and Convective Drying. *Food Engineering Reviews*, 1-14.
- Carvalho, G. R., Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2020). Drying Accelerators to Enhance Processing and Properties: Ethanol, Isopropanol, Acetone and Acetic Acid as Pre-treatments to Convective Drying of Pumpkin. *Food and Bioprocess Technology*, 1-13.
- Chayjan, R. A., Kaveh, M., & Khayati, S. (2017). Modeling some thermal and physical characteristics of terebinth fruit under semi industrial continuous drying. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(1), 12-23.
- Chen, X. D., & Mujumdar, A. S. (2009). *Drying technologies in food processing*. John Wiley & Sons.
- Clark, J. P. (2008). Update on ultrasonics. *Food technology*.
- Colak, N., & Hepbasli, A. (2009). A review of heat pump drying: Part 1—Systems, models and studies. *Energy conversion and management*, 50(9), 2180-2186.
- Corrêa, J., Rasia, M., Mulet, A., & Cárcel, J. (2017). Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 284-291.
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Oxford university press.
- Cárcel, J., García-Pérez, J., Riera, E., & Mulet, A. (2007). Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology*, 25(1), 185-193.

- da Rosa, G. S., Vanga, S. K., Gariepy, Y., & Raghavan, V. (2019). Comparison of microwave, ultrasonic and conventional techniques for extraction of bioactive compounds from olive leaves (*Olea europaea* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *58*, 102234.
- De la Fuente-Blanco, S., De Sarabia, E. R.-F., Acosta-Aparicio, V., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, *44*, e523-e527.
- De Los Santos Pazos, L. G. C. N., Danny, Vega Anticona, A., Linares, G., Sánchez-González, J., Miano, A. C., & Rojas, M. L. (2021). Cut orientation and drying temperature effect on drying and rehydration kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). In.
- Dibagar, N., Kowalski, S. J., Chayjan, R. A., & Figiel, A. (2020). Accelerated convective drying of sunflower seeds by high-power ultrasound: Experimental assessment and optimization approach. *Food and Bioproducts Processing*.
- Dickison, W. C. (2000). *Integrative plant anatomy*. Academic press.
- Doymaz, İ., & İsmail, O. (2011). Drying characteristics of sweet cherry. *Food and bioproducts processing*, *89*(1), 31-38.
- Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2017). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *57*(4), 701-717.
- Feng, H., Barbosa-Cánovas, G. V., & Weiss, J. (2011). *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (Vol. 1). Springer.
- Feng, Y., Zhou, C., Yagoub, A. E. A., Sun, Y., Owusu-Ansah, P., Yu, X., . . . Ren, Z. (2019). Improvement of the catalytic infrared drying process and quality characteristics of the dried garlic slices by ultrasound-assisted alcohol pretreatment. *LWT*, *116*, 108577.
- Fernandes, F. A., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT-Food Science and Technology*, *41*(4), 604-610.
- Fernandes, F. A., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, *90*(2), 186-190.
- Fernandes, F. A., Linhares Jr, F. E., & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics sonochemistry*, *15*(6), 1049-1054.
- Fernandes, F. A., Oliveira, F. I., & Rodrigues, S. (2008). Use of ultrasound for dehydration of papayas. *Food and Bioprocess Technology*, *1*(4), 339-345.
- Floros, J. D., & Liang, H. (1994). Acoustically assisted diffusion through membranes and biomaterials. *Food Technology*, *48*(12), 79-84.
- Funebo, T., Ahrné, L., Prothon, F., Kidman, S., Langton, M., & Skjöldebrand, C. (2002). Microwave and convective dehydration of ethanol treated and frozen apple—physical properties and drying kinetics. *International journal of food science & technology*, *37*(6), 603-614.
- Fyen, W., Holsteyns, F., Bearda, T., Arnauts, S., Van Steenberghe, J., Doumen, G., . . . Mertens, P. W. (2008). A Detailed Study of Semiconductor Wafer Drying. In *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (pp. 1067-1136). Elsevier.

- Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez-Corral, G., Gálvez Moraleda, J., & Yang, T. (1999). A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*, 17(3), 597-608.
- Gallego-Juárez, J. (1998). Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. In *Ultrasound in food processing* (pp. 127-143). Chapman & Hall, London, UK.
- Gallego-Juárez, J. A., & Graff, K. F. (2014). *Power ultrasonics: applications of high-intensity ultrasound*. Elsevier.
- García-Pérez, J., Cárcel, J., Benedito, J., & Mulet, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3), 247-254.
- García-Pérez, J., Cárcel, J., De la Fuente-Blanco, S., & De Sarabia, E. R.-F. (2006). Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: parametric study. *Ultrasonics*, 44, e539-e543.
- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A. F., Silva, P. F., Valdes-Serra, J. C., & Pavlak, M. C. d. M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Food Science and Technology*, 30(1), 179-182.
- Guedes, J. S., Santos, K. C., Castanha, N., Rojas, M. L., Junior, M. D. M., Lima, D. C., & Augusto, P. E. (2021). Structural modification on potato tissue and starch using ethanol pre-treatment and drying process. *Food Structure*, 29, 100202.
- Gultekinoglu, M., Jiang, X., Bayram, C., Wu, H., Ulubayram, K., & Edirisinghe, M. (2020). Self-assembled micro-stripe patterning of sessile polymeric nanofluid droplets. *Journal of colloid and interface science*, 561, 470-480.
- Hadidi, M., Amoli, P. I., Jelyani, A. Z., Hasiri, Z., Rouhafza, A., Ibarz, A., . . . Tabrizi, S. T. (2020). Polysaccharides from pineapple core as a canning by-product: Extraction optimization, chemical structure, antioxidant and functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 2357-2364.
- Hasan Masud, M., Karim, A., Ananno, A. A., & Ahmed, A. (2020). Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges. In: Springer.
- Hayat, T., Khan, M. I., Farooq, M., Alsaedi, A., & Yasmeen, T. (2017). Impact of Marangoni convection in the flow of carbon–water nanofluid with thermal radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 810-815.
- Henderson, S. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1168.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2017). Alcance de la Investigación.
- Herppich, W. B., Huyskens-Keil, S., & Hassenberg, K. (2015). Impact of ethanol treatment on the chemical properties of cell walls and their influence on toughness of White Asparagus (*Asparagus officinalis* L.) spears. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1476-1484.
- Hibiya, T., Nakamura, S., Azami, T., Sumiji, M., Imaishi, N., Mukai, K., . . . Yoda, S.-I. (2001). Marangoni flow of molten silicon. *Acta Astronautica*, 48(2-3), 71-78.

- Ishtiaq, F., Farooq, R., Farooq, U., Farooq, A., Siddique, M., Shah, H., & Mukhtar-Ul-Hassan, M. A. S. (2009). Application of ultrasound in pharmaceuticals. *World Applied Sciences Journal*, 6(7), 886-893.
- Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2010). Drying of foods, vegetables and fruits. *Published in Singapore*.
- Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). Protection of foods by drying. *Modern food microbiology*, 443-456.
- Jencyk, J., Woźniak-Budych, M., Jarek, M., Grzeszkowiak, M., Nowaczyk, G., & Jurga, S. (2017). Nanoparticle string formation on self-assembled copolymer films. *Applied Surface Science*, 406, 235-244.
- Kahveci, K., & Cihan, A. (2008). *Drying of food materials: transport phenomena*. Nova Science Publishers.
- Karapantsios, T. D. (2006). Conductive drying kinetics of pregelatinized starch thin films. *Journal of food engineering*, 76(4), 477-489.
- Karim, M. A., Rahman, M. M., Pham, N. D., & Fawzia, S. (2018). Food Microstructure as affected by processing and its effect on quality and stability. In *Food microstructure and its relationship with quality and stability* (pp. 43-57). Elsevier.
- Kaveh, M., Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., & Moghimi, M. B. F. (2018). The effect of ultrasound pre-treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7), e12868.
- Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2011). The physical and chemical effects of ultrasound. In *Ultrasound technologies for food and bioprocessing* (pp. 1-12). Springer.
- Khmelev, V. N., Lebedev, A. N., & Khmelev, M. V. (2006). Ultrasonic drying and presowing treatment of seeds. *International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials*,
- Khmelev, V. N., Shalunov, A. V., Barsukov, R. V., Abramenko, D. S., & Lebedev, A. N. (2011). Studies of ultrasonic dehydration efficiency. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 12(4), 247-254.
- Kosasih, E. A., Zikri, A., & Dzaky, M. I. (2020). Effects of drying temperature, airflow, and cut segment on drying rate and activation energy of elephant cassava. *Case Studies in Thermal Engineering*, 19, 100633.
- Kotěna, J., Minařík, A., Wrzecionko, E., Smolka, P., Minaříková, M., Minařík, M., . . . Machovský, M. (2017). The effect of temperature gradient on the variation of surface topography and reflectivity of anisotropically etched silicon wafers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 262, 1-9.
- Law, C., Chen, H., & Mujumdar, A. (2014). *Food technologies: drying*.
- Lee, J., Tuziuti, T., Yasui, K., Kentish, S., Grieser, F., Ashokkumar, M., & Iida, Y. (2007). Influence of surface-active solutes on the coalescence, clustering, and fragmentation of acoustic

- bubbles confined in a microspace. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(51), 19015-19023.
- Leighton, T. (1998). The principles of cavitation. *Ultrasound in food processing*, 12.
- LeLAS, V. (2007). Ultrasonic effect on pH, electric conductivity, and tissue surface of button mushrooms, brussels sprouts and cauliflower. *Czech J. Food Sci. Vol*, 25(2), 90-100.
- Lewicki, P. P. (1998). Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36(1), 81-87.
- Lewicki, P. P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17(4), 153-163.
- Liang, H. (1995). Modeling of ultrasound assisted and osmotically induced diffusion in plant tissue.
- Lin, X., Xu, J.-L., & Sun, D.-W. (2020). Evaluating drying feature differences between ginger slices and splits during microwave-vacuum drying by hyperspectral imaging technique. *Food Chemistry*, 332, 127407.
- Loginova, K., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2011). Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet. *Journal of Food Engineering*, 106(2), 127-133.
- Luengwilai, K., Beckles, D. M., & Siriphanich, J. (2016). Postharvest internal browning of pineapple fruit originates at the phloem. *Journal of plant physiology*, 202, 121-133.
- López-Mejía, N., Andrade-Mahecha, M. M., & Martínez-Correa, H. A. (2019). Modelamiento matemático de la cinética de secado de espagueti enriquecido con pulpa de zapallo deshidratada (Cucurbita moschata). *Revista Udca Actualidad & Divulgacion Cientifica*, 22(1).
- López-Méndez, E., Ortiz-García-Carrasco, B., Ruiz-Espinosa, H., Sampieri-Croda, A., García-Alvarado, M., Ochoa-Velasco, C., . . . Ruiz-López, I. (2018). Effect of shape change and initial geometry on water diffusivity estimation during drying of gel model systems. *Journal of Food Engineering*, 216, 52-64.
- Maimaiti, N., Aili, N., Khan, M. K., Tang, Z., Jiang, G., & Liu, Z. (2020). Ethanol shock enhances the recovery of anthocyanin from lowbush blueberry. *Chinese Journal of Chemical Engineering*.
- Marabi, A., Jacobson, M., Livings, S., & Saguy, I. (2004). Effect of mixing and viscosity on rehydration of dry food particulates. *European Food Research and Technology*, 218(4), 339-344.
- Marabi, A., & Saguy, I. S. (2004). Effect of porosity on rehydration of dry food particulates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(10), 1105-1110.
- Marangoni, C. (1871). Sul principio della viscosita' superficiale dei liquidi stabilito dalsig. J. Plateau. *Il Nuovo Cimento (1869-1876)*, 5(1), 239-273.
- Mason, T., & Cordemans, E. (1996). Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: a review. *Chemical engineering research & design*, 74(5), 511-516.
- Mason, T. J., & Lorimer, J. P. (2002). Applied sonochemistry: the uses of power ultrasound in chemistry and processing.

- Masud, M. H., Karim, A., Ananno, A. A., & Ahmed, A. Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges. In: Springer.
- Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. (2020). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*.
- Mghazli, S., Ouhammou, M., Hidar, N., Lahnine, L., Idlimam, A., & Mahrouz, M. (2017). Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves. *Renewable Energy*, 108, 303-310.
- Miano, A. C., Ibarz, A., & Augusto, P. E. D. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 413-419.
- Miano, A. C., Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2019). Structural changes caused by ultrasound pretreatment: Direct and indirect demonstration in potato cylinders. *Ultrasonics sonochemistry*, 52, 176-183.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying technology*, 20(7), 1503-1513.
- Montañés, F., Olano, A., Ibáñez, E., & Fornari, T. (2007). Modeling solubilities of sugars in alcohols based on original experimental data. *AIChE journal*, 53(9), 2411-2418.
- Moses, J., Norton, T., Alagusundaram, K., & Tiwari, B. (2014). Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3), 43-55.
- Mujumdar, A. (2006). Handbook of industrial drying, 3rd Enhanced Edition, Ed. AS Mujumdar. In: Taylor & Francis, NY.
- Mulet, A., Cárcel, J., Sanjuan, N., & Bon, J. (2003). New food drying technologies-Use of ultrasound. *Food Science and Technology International*, 9(3), 215-221.
- Muralidhara, H., Ensminger, D., & Putnam, A. (1985). Acoustic dewatering and drying (low and high frequency): State of the art review. *Drying Technology*, 3(4), 529-566.
- Musielak, G., Mierzwa, D., & Kroehnke, J. (2016). Food drying enhancement by ultrasound—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 126-141.
- Ngamwonglumlert, L., & Devahastin, S. (2018). Microstructure and its relationship with quality and storage stability of dried foods. In *Food Microstructure and Its Relationship with Quality and Stability* (pp. 139-159). Elsevier.
- Nikolov, A., Wasan, D., & Lee, J. (2018). Tears of wine: The dance of the droplets. *Advances in colloid and interface science*, 256, 94-100.
- Niu, D., Wang, L.-H., Zeng, X.-A., Wen, Q.-H., Brennan, C. S., Tang, Z.-S., & Wang, M.-S. (2019). Effect of ethanol adaption on the inactivation of *Acetobacter* sp. by pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 25-33.
- Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(3), 353-360.

- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), 599-618.
- 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. *Journal of Food Science*, 27(SI), S297-S300.
- Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers.
- Pakbin, B., Rezaei, K., & Haghghi, M. (2015). An introductory review of applications of ultrasound in food drying processes. *Journal of Food Processing & Technology*, 6(1), 1.
- Parniakov, O., Lebovka, N., Van Hecke, E., & Vorobiev, E. (2014). Pulsed electric field assisted pressure extraction and solvent extraction from mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and bioprocess technology*, 7(1), 174-183.
- Patist, A., & Bates, D. (2008). Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innovative food science & emerging technologies*, 9(2), 147-154.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food science*, 53(4), 1216-1217.
- Poursamad, J., Jahanbakhsh, F., Asadpour, M., & Phirouznia, A. (2013). The Marangoni effect in nematic liquid crystals due to a Gaussian light beam absorption. *Journal of Molecular Liquids*, 186, 23-27.
- Povey, M. J., & Mason, T. J. (1998). *Ultrasound in food processing*. Springer Science & Business Media.
- Rani, P., & Tripathy, P. (2019). Effect of ultrasound and chemical pretreatment on drying characteristics and quality attributes of hot air dried pineapple slices. *Journal of food science and technology*, 56(11), 4911-4924.
- Rapp, B. E. (2016). *Microfluidics: modeling, mechanics and mathematics*. William Andrew.
- Rastogi, N., Nguyen, L. T., & Balasubramaniam, V. (2008). Effect of pretreatments on carrot texture after thermal and pressure-assisted thermal processing. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 541-547.
- Rastogi, N. K., & Knorr, D. (2013). *Recent developments in high pressure processing of foods*. Springer.
- Ratti, C. (2008). *Advances in food dehydration*. CRC Press.
- Ren, Z., Yu, X., Yagoub, A. E. A., Fakayode, O. A., Ma, H., Sun, Y., & Zhou, C. (2021). Combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *LWT*, 111238.
- Riera, E., Gallego Juárez, J. A., Rodríguez Corral, G., Acosta Aparicio, V. M., & Andrés Gallego, E. (2002). Application of high-power ultrasound for drying vegetables.

- Riera, E., Golas, Y., Blanco, A., Gallego, J., Blasco, M., & Mulet, A. (2004). Mass transfer enhancement in supercritical fluids extraction by means of power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 11(3-4), 241-244.
- Rinaldi, M., Littardi, P., Ganino, T., Aldini, A., Rodolfi, M., Barbanti, D., & Chiavaro, E. (2020). Comparison of physical, microstructural, antioxidant and enzymatic properties of pineapple cubes treated with conventional heating, ohmic heating and high-pressure processing. *LWT*, 134, 110207.
- Rizvi, S. S. (1986). Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering properties of foods*, 2, 223-309.
- Rojas, M., Augusto, P., & Cárcel, J. (2020). Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 102328.
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. (2018a). Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 65-75.
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. (2018b). Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. *Journal of food engineering*, 233, 17-27.
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. (2018c). Microstructure elements affect the mass transfer in foods: The case of convective drying and rehydration of pumpkin. *Lwt*, 93, 102-108.
- Rojas, M. L., Gomes, B. d. O., Carvalho, G. R., Santos, K. C., Guedes, J. S., Bitencourt, B. S., & Augusto, P. E. D. (2021). Convective drying of cambuci, a native fruit from the Brazilian Atlantic Forest: Effect of pretreatments with ethanol and freezing. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), e13822.
- Rojas, M. L., Silveira, I., & Augusto, P. E. D. (2020). Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 20-30.
- Sabarez, H. (2016). Airborne ultrasound for convective drying intensification. In *Innovative food processing technologies* (pp. 361-386). Elsevier.
- Sabarez, H. (2016). Drying of food materials.
- Sabarez, H. (2020). Advanced Drying Technologies of Relevance in the Food Industry.
- Sagar, V., & Kumar, P. S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of food science and technology*, 47(1), 15-26.
- Sansiribhan, S., Devahastin, S., & Soponronnarit, S. (2010). Quantitative evaluation of microstructural changes and their relations with some physical characteristics of food during drying. *Journal of food science*, 75(7), E453-E461.
- Santos, K. C., Guedes, J. S., Rojas, M. L., de Carvalho, G. R., & Augusto, P. E. D. (2020). Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105304.
- Santos, N. C., Almeida, R. L. J., da Silva, L. R. I., de Sousa Muniz, C. E., dos Santos Pereira, T., de Alcântara Silva, V. M., . . . da Silva Eduardo, R. (2020). Determination of kinetic

- parameters during the pineapple peel drying process. *Research, Society and Development*, 9(4), 10.
- 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.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J., & Hamdy, M. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5(4), 1261-1265.
- Sherwood, T. (1931). Application of theoretical diffusion equations to the drying of solids. *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs*, 27(190-202), 21.
- Simal, S., Benedito, J., Sánchez, E. S., & Rosselló, C. (1998). Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. *Journal of Food engineering*, 36(3), 323-336.
- 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.
- Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 194-201.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2001). *Introduction to food engineering*. Gulf Professional Publishing.
- Sinha, N., Hui, Y. H., Evranuz, E. Ö., Siddiq, M., & Ahmed, J. (2010). *Handbook of vegetables and vegetable processing*. John Wiley & Sons.
- SMITH, P. G. (2003). Introduction to food process engineering. *Chemical engineer*(742), 56-56.
- Soares, P. A., Vaz, A. F., Correia, M. T., Pessoa Jr, A., & Carneiro-da-Cunha, M. G. (2012). Purification of bromelain from pineapple wastes by ethanol precipitation. *Separation and purification technology*, 98, 389-395.
- Soria, A. C., & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in food science & technology*, 21(7), 323-331.
- Soysal, Y. (2004). Microwave drying characteristics of parsley. *Biosystems engineering*, 89(2), 167-173.
- Srikiatden, J., & Roberts, J. S. (2007). Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties*, 10(4), 739-777.
- Su, Q., Xue, T., Zhang, Y., Lan, K., & Zou, Q. (2019). Fabrication of enhanced silver nanowire films via self-assembled gold nanoparticles without post-treatment. *Materials Letters*, 236, 218-221.
- Szadzińska, J., Łechtańska, J., Pashminehazar, R., Kharaghani, A., & Tsotsas, E. (2019). Microwave- and ultrasound-assisted convective drying of raspberries: Drying kinetics and microstructural changes. *Drying Technology*, 37(1), 1-12.

- Tang, X. C., Nail, S. L., & Pikal, M. J. (2005). Freeze-drying process design by manometric temperature measurement: design of a smart freeze-dryer. *Pharmaceutical research*, 22(4), 685-700.
- Thomson, J. (1855). XLII. On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 10(67), 330-333.
- Tilli, M. (2020). Silicon wafers preparation and properties. In *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies* (pp. 93-110). Elsevier.
- Torringa, E., Esveld, E., Scheewe, I., van den Berg, R., & Bartels, P. (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of food engineering*, 49(2-3), 185-191.
- Tsotsas, E., & Mujumdar, A. S. (2007). *Modern drying technology*. Wiley Online Library.
- Tyree, M. T., & Zimmermann, M. (2002). Hydraulic architecture of whole plants and plant performance. In *Xylem structure and the ascent of sap* (pp. 175-214). Springer.
- Van Deventer, H. C., & Heijmans, R. M. (2001). Drying with superheated steam. *Drying Technology*, 19(8), 2033-2045.
- Varzakas, T., & Tzia, C. (2014). *Food Engineering Handbook, Two Volume Set* (Vol. 31). CRC Press.
- Venerus, D. C., & Simavilla, D. N. (2015). Tears of wine: New insights on an old phenomenon. *Scientific reports*, 5, 16162.
- Villamiel, M., García-Pérez, J. V., Montilla, A., Carcel, J. A., & Benedito, J. (2017). *Ultrasound in food processing: Recent advances*. John Wiley & Sons.
- Wang, X., Feng, Y., Zhou, C., Sun, Y., Wu, B., Yagoub, A. E. A., & Aboagarib, E. A. A. (2019). Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion (*Allium fistulosum*). *Food chemistry*, 295, 432-440.
- Yagcioglu, A. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. Proceedings of the 7th International congress on agricultural mechanization and energy, 1999,
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., & Oliveira, F. A. (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of food engineering*, 84(3), 430-440.
- Yanniotis, S., Taoukis, P., Stoforos, N. G., & Karathanos, V. T. (2013). *Advances in food process engineering research and applications*. Springer.
- Yao, Y. (2016). Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration. *Ultrasonics sonochemistry*, 31, 512-531.
- Yildirim, A., ÖNER, M. D., & Bayram, M. (2010). Modeling of water absorption of ultrasound applied chickpeas (*Cicer arietinum* L.) using Peleg's equation.
- Zhu, Y., Vanga, S. K., Wang, J., & Raghavan, V. (2018). Effects of ultrasonic and microwave processing on avidin assay and secondary structures of egg white protein. *Food and Bioprocess Technology*, 11(11), 1974-1984.

Zubernik, J., Dadan, M., Cichowska, J., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The Impact of the Pre-Treatment in Ethanol Solution on the Drying Kinetics and Selected Properties of Convective Dried Apples. *International Journal of Food Engineering*, 16(1-2).

Apéndice

Tabla 4

Valores del tiempo promedio de secado de las muestras de corte longitudinal y transversal

Tiempo promedio de Secado					
Humedad 25% (w.b)	Tratamientos				
	CONTROL	E 5	E 10	E + US 5	E + US 10
Lc	608.1637	1108.445	484.6347	640.0752	583.9982
Tc	917.5021	515.6405	444.2054	500.7731	364.1739

Tabla 5

Valores de tamaño y encogimiento de las muestras después del pretratamiento, antes del pretratamiento y antes del secado, después del pretratamiento y después del secado, y volumen total

Encogimiento después del pretratamiento						
25%	Control	E5	E10	E+US5	E+US10	
LC	100	90.98	88.65	89.01	87.39	
TC	100	89.76	89.32	89.33	79.21	
Encogimiento antes del pretratamiento y antes del secado						
25%	Control	E5	E10	E+US5	E+US10	
LC	36.01	37.41	37.24	42.45	39.45	
TC	20.8	25.59	24.66	30.16	28.13	
Encogimiento después del pretratamiento y después del secado						
25%	Control	E5	E10	E+US5	E+US10	
LC	36.01	34.02	32.4	37.7	34.49	
TC	20.8	22.83	21.96	26.96	21.83	
Volumen Total						
25%	Control	E5	E10	E+US5	E+US10	
LC	17.67	16.78	16.21	19.97	17.61	
TC	10.38	12.22	11.24	15.03	11.12	

Tabla 6

Valores de textura (energía de compresión) del corte longitudinal

Longitudinal cut (Lc)

Tratamientos	Prueba			Promedio	S.D
	R1	R2	R3		
CONTROL	0.10295	0.08982	0.09839	0.09705177	0.00666
E5	0.12875	0.08573	0.13627	0.11691433	0.02727
E10	0.13515	0.09409	0.08161	0.10361467	0.02801
E+US5	0.07278	0.07445	0.11528	0.087504	0.02407
E+US10	0.08282	0.06983	0.08862	0.08042333	0.00962

Tabla 7

Valores de textura (energía de compresión) del corte transversal

Corte Transversal (Tc)					
Tratamientos	Prueba			Promedio	D.P
	R1	R2	R3		
CONTROL	0.10219	0.08982	0.10039	0.09746767	0.00668
E5	0.09108	0.12218	0.12252	0.111927	0.01805
E10	0.07679	0.10869	0.07886	0.08811367	0.01785
E+US5	0.06415	0.06596	0.10747	0.07918967	0.0245
E+US10	0.07679	0.06983	0.08862	0.078413	0.0095