

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN ASISTIDO CON
ULTRASONIDO EN PAPA (*Solanum Tuberosum*)”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

PRESENTADO POR:

Bach. Vásquez Ocaña Alberto David

Bach. Ita Sánchez Rose Mary Isabel

ASESOR : Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta

COASESOR : Dr. Raúl Benito Siche Jara

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2021



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
E.P. DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



HOJA DE AVAL DE JURADO EVALUADOR

El presente trabajo de tesis titulado: “**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN ASISTIDO CON ULTRASONIDO EN PAPA (*Solanum Tuberosum*)**”, para obtener el título profesional de ingeniero agroindustrial, presentado por los bachilleres VÁSQUEZ OCAÑA ALBERTO DAVID e ITA SÁNCHEZ ROSE MARY ISABEL, teniendo como asesor al Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta, designado mediante la resolución decanal N° 242-2017-UNS-FI, ha sido revisada y aprobada el día 17 de febrero del 2021, por el siguiente jurado evaluador, designados mediante resolución N° 411-2019-UNS-CFI.

Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Presidente

Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta
Secretario

Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda
Integrante



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA
E.P. DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 07:00 pm, del primero de marzo del dos mil veintiuno se habilitó la plataforma virtual Zoom, con el enlace: <https://uns-edu-pe.zoom.us/j/83752470752?pwd=Ly9UdIRKTDBKYlZsdIBBQU1wWm9zdz09>, el Jurado Evaluador, designado mediante resolución N° 411-2019-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dra. Elza Berta Aguirre Vargas** (Presidente)
- **Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta.** (Secretario)
- **Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda** (Integrante)

Para inicio a la Sustentación y Evaluación de Tesis, titulada:

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN ASISTIDO CON ULTRASONIDO EN PAPA (*Solanum Tuberosum*)”, elaborada por los bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

VÁSQUEZ OCAÑA ALBERTO DAVID
ITA SÁNCHEZ ROSE MARY ISABEL

Asimismo, tiene como Asesor al docente **Dr. VÍCTOR AUGUSTO CASTRO ZAVALETA.**

Finalizada la sustentación, los Tesisistas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y el Público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, con las sugerencias pertinentes y en concordancia con el Artículo 103° del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
VÁSQUEZ OCAÑA ALBERTO DAVID	18	MUY BUENO

Siendo la 08:30 p.m. del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el presente jurado.

Nuevo Chimbote, 01 de marzo del 2021

Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta
Secretario

Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Presidente

Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda
Integrante



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA
E.P. DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 07:00 pm, del primero de marzo del dos mil veintiuno se habilitó la plataforma virtual Zoom, con el enlace: <https://uns-edu-pe.zoom.us/j/83752470752?pwd=Ly9UdlRKTDBKYlZsdlBBQU1wWm99zd09>, el Jurado Evaluador, designado mediante resolución N° 411-2019-UNS-CFI integrado por los docentes:

- **Dra. Elza Berta Aguirre Vargas** (Presidente)
- **Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta.** (Secretario)
- **Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda** (Integrante)

Para inicio a la Sustentación y Evaluación de Tesis, titulada:

“**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN ASISTIDO CON ULTRASONIDO EN PAPA (*Solanum Tuberosum*)**”, elaborada por los bachilleres en Ingeniería Agroindustrial:

VÁSQUEZ OCAÑA ALBERTO DAVID
ITA SÁNCHEZ ROSE MARY ISABEL

Asimismo, tiene como Asesor al docente **Dr. VÍCTOR AUGUSTO CASTRO ZAVALAETA.**

Finalizada la sustentación, los Tesistas respondieron las preguntas formuladas por los miembros del Jurado y el Público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, con las sugerencias pertinentes y en concordancia con el Artículo 103° del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declaran:

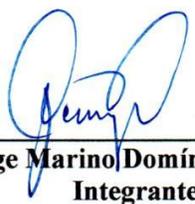
BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
ITA SÁNCHEZ ROSE MARY ISABEL	18	MUY BUENO

Siendo la 08:30 p.m. del mismo día, se dio por terminada dicha sustentación, firmando en señal de conformidad el presente jurado.

Nuevo Chimbote, 01 de marzo del 2021


Dr. Víctor Augusto Castro Zavaleta
Secretario


Dra. Elza Berta Aguirre Vargas
Presidente


Dr. Jorge Marino Domínguez Castañeda
Integrante

DEDICATORIA

**A mis padres Francisco y Blanca,
por su apoyo incondicional en mis
años de estudio, por enseñarme a
ser perseverante, y por lograr mis
objetivos.**

**A mis hijos Adriana y Raphael
por ser el motivo de mi
culminación profesional y a mi
esposo por ser mi amigo y apoyo
incondicional.**

ROSE MARY ISABEL ITA SÁNCHEZ

A mi madre, Reyda, por su invaluable apoyo en la consecución de este logro profesional.

A mis hijos, Adriana y Raphael, recordatorios motivacionales permanentes, para la constancia y dedicación en el logro de mis objetivos.

A mi esposa, fiel compañera de vida.

ALBERTO DAVID VÁSQUEZ OCAÑA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su amor incondicional y la fortaleza que nos da en el camino de nuestras vidas.

A los Profesores, por los conocimientos impartidos y compartidos, a la amistad forjada con más de uno de ellos.

A nuestro Asesor, por brindarnos su amistad, confianza y apoyo constante durante la ejecución, corrección y sugerencias para la culminación del presente trabajo.

A nuestro Co Asesor, por brindarnos el acceso al laboratorio de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de Trujillo y el apoyo en la realización del proyecto.

Tesis de Ita corregida

por Víctor Castro

Fecha de entrega: 07-jul-2020 04:57p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 1354718776

Nombre del archivo: Tesis_final_Ita_-_V_squez_Corregido.pdf (2.77M)

Total de palabras: 10966

Total de caracteres: 55870

Tesis de Ita corregida

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

14%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	www.redalyc.org Fuente de Internet	2%
3	Submitted to Universidad Privada Antenor Orrego Trabajo del estudiante	2%
4	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante	1%
6	Submitted to Universidade de Sao Paulo Trabajo del estudiante	1%
7	Cinthia Ricce, Meliza Lindsay Rojas, Alberto Claudio Miano, Raul Siche, Pedro Esteves Duarte Augusto. "Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration", Food Research International, 2016 Publicación	1%

ÍNDICE

RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUCCIÓN.....	19
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 Papa	22
2.2. Ultrasonido.....	23
2.3. Ultrasonido en Procesamiento de Alimentos	23
2.4. Efectos del Ultrasonido	24
2.5. Secado.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. Materia prima	27
3.2. Pre-tratamiento con Ultrasonido	27
3.3. Secado y Rehidratación	28
3.3.1. Secado.....	28
3.3.2. Rehidratación	28
3.4. Modelamiento Matemático	30
3.4.1. Modelamiento Matemático del Secado	30
3.4.2. Modelamiento Matemático de Rehidratación.....	31
3.5. Optimización del Proceso de Rehidratación	32
3.5.1. Screening de Plackett - Burman.....	32
3.5.2. Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR)	33
3.6. Análisis Estadístico	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1. Efecto del Ultrasonido en el Secado	36

4.2. Modelamiento del secado.....	41
4.3. Efecto del Ultrasonido en la Rehidratación	48
4.4. Placket - Burman	61
4.5. Optimización por DCCR.....	63
5. CONCLUSIONES.....	68
6. RECOMENDACIONES.....	69
7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS	70
8. ANEXOS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cinética del Secado y Rehidratación.	29
Figura 2. Proceso de Optimización.....	35
Figura 3. Porcentaje de pérdida de agua en la muestra control y las muestras pre-tratadas con US secadas a 40 °C.....	37
Figura 4. Porcentaje de pérdida de agua en la muestra control y las muestras pre-tratadas con US secadas a 60 °C.....	38
Figura 5. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Page.....	44
Figura 6. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Henderson.	45
Figura 7. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Lewis.....	46
Figura 8. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Two-terms..	47
Figura 9. Ganancia de agua en muestra control y muestras pre-tratadas con US sec. a 60 °C...	49
Figura 10. Ganancia de agua en muestra control y muestras pre-tratadas con US sec. a 40 °C..	50
Figura 11. Muestras de rodajas de papa después del secado.....	51
Figura 12. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 60 °C utilizando el modelo de Peleg...	53
Figura 13. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 40 °C utilizando el modelo de Peleg...	54
Figura 14. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 60 °C y 30 min de US modelo de Peleg.....	55
Figura 15. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 40 °C y 30 min de US modelo de Peleg.....	56
Figura 16. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 60 °C y 45 min de US modelo de Peleg.....	57

Figura 17. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 40 °C y 45 min de US modelo de Peleg.....	58
Figura 18. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 60 °C y 60 min de US modelo de Peleg.....	59
Figura 19. Mod. de la rehidratación de papa secadas a 40 °C y 60 min de US modelo de Peleg.....	60
Figura 20. Superficie de Contorno.....	66
Figura 21. Papa Amarilla-Control Tratamiento 0' temperatura: 40°C.....	85
Figura 22. Papa Amarilla Tratamiento 0' U.S: 30' temperatura: 40°C.....	85
Figura 23. Papa Amarilla Control Tratamiento 5' Temperatura: 40°C.....	85
Figura 24. Papa Amarilla Tratamiento 5' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	86
Figura 25. Papa Amarilla Control Tratamiento 10' Temperatura: 40°C.....	86
Figura 26. Papa Amarilla Tratamiento 10' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	86
Figura 27. Papa Amarilla Control Tratamiento 15' Temperatura: 40°C.....	87
Figura 28. Papa Amarilla Tratamiento 15' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	87
Figura 29. Papa Amarilla Control Tratamiento 20' Temperatura: 40°C.....	87
Figura 30. Papa Amarilla Tratamiento 20' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	88
Figura 31. Papa Amarilla Control Tratamiento 30' Temperatura: 40°C.....	88
Figura 32. Papa Amarilla Tratamiento 30' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	88
Figura 33. Papa Amarilla Control Tratamiento 40' Temperatura: 40°C.....	89
Figura 34. Papa Amarilla Tratamiento 40' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	89
Figura 35. Papa Amarilla Control Tratamiento 60' Temperatura: 40°C.....	89
Figura 36. Papa Amarilla Tratamiento 60' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	90
Figura 37. Papa Amarilla Control Tratamiento 80' Temperatura: 40°C.....	90
Figura 38. Papa Amarilla Tratamiento 80' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	90

Figura 39. Papa Amarilla Control Tratamiento 100' Temperatura: 40°C.....	91
Figura 40. Papa Amarilla Tratamiento 100' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	91
Figura 41. Papa Amarilla Control Tratamiento 120' Temperatura: 40°C.....	91
Figura 42. Papa Amarilla Tratamiento 120' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	92
Figura 43. Papa Amarilla Control Tratamiento 140' Temperatura: 40°C.....	92
Figura 44. Papa Amarilla Tratamiento 140' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	92
Figura 45. Papa Amarilla Control Tratamiento 160' Temperatura: 40°C.....	93
Figura 46. Papa Amarilla Tratamiento 160' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	93
Figura 47. Papa Amarilla Control Tratamiento 180' Temperatura: 40°C.....	93
Figura 48. Papa Amarilla Tratamiento 180' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	94
Figura 49. Papa Amarilla Control Tratamiento 200' Temperatura: 40°C.....	94
Figura 50. Papa Amarilla Tratamiento 200' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	94
Figura 51. Papa Amarilla Control Tratamiento 220' Temperatura: 40°C.....	95
Figura 52. Papa Amarilla Tratamiento 220' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	95
Figura 53. Papa Amarilla Control Tratamiento 240' Temperatura: 40°C.....	95
Figura 54. Papa Amarilla Tratamiento 240' U.S: 30' Temperatura: 40°C.....	96
Figura 55. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 0' 40°C.....	96
Figura 56. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 5' 40°C.....	96
Figura 57. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 10' 40°C.....	97
Figura 58. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 15' 40°C.....	97
Figura 59. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 20' 40°C.....	97
Figura 60. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 25' 40°C.....	98
Figura 61. Rehidratación Papa Amarilla US 30' secado 0' 40°C.....	98
Figura 62. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 35' 40°C.....	98
Figura 63. Rehidratación Papa Amarilla US 30' secado 5' 40°C.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Modelos Matemáticos Empíricos.....	30
Tabla N° 2. Diseño Experimental de Placket-Burman.....	33
Tabla N° 3. Variables Significativas para el DCCR.....	34
Tabla 4. Parámetros de las ecuaciones empíricas para el modelamiento del proceso de secado de las rodajas de papa pre-tratadas con ultrasonido.....	42
Tabla 5. Placket-Burman en la ganancia de agua de rehidratación.....	62
Tabla 6. Análisis de efectos del diseño Placket-Burman para la ganancia porcentual de agua en la rehidratación en rodajas de papa.....	63
Tabla 7. Optimización mediante DCCR para la rehidratación porcentual de agua en las rodajas de papa.....	64
Tabla 8. Análisis de efectos del DCCR para la ganancia porcentual de agua en la rehidratación en rodajas de papa.....	65
Tabla 9. Peso de Muestras Control secadas a 60 °C (3 repeticiones).....	75
Tabla 10. Peso de Muestras Control secadas a 40 °C (3 repeticiones).....	76
Tabla 11. Peso de Muestras pre tratadas a 30 min con ultrasonido secadas a 60 °C.....	77
Tabla 12. Peso de Muestras pre tratadas a 30 min con ultrasonido secadas a 40 °C (3 Repeticiones).....	78
Tabla 13. Peso de Muestras pre tratadas a 45 min con ultrasonido secadas a 60 °C (3 Repeticiones).....	79
Tabla 14. Peso de Muestras pre tratadas a 45 min con ultrasonido secadas a 40 °C (3 Repeticiones).....	80
Tabla 15. Peso de Muestras pre tratadas a 60 min con ultrasonido secadas a 60 °C (3 Repeticiones).....	81

Tabla 16. Peso de Muestras pre tratadas a 60 min con ultrasonido secadas a 40 °C (3 Repeticiones).....	82
Tabla 17. Ganancia de Agua de Muestras pre tratadas a 0, 30, 45 y 60 min. con ultrasonido, secadas a 60 °C.....	83
Tabla 18. Ganancia de Agua de Muestras pre tratadas a 0, 30, 45 y 60 min. con ultrasonido, secadas a 40 °C.	84

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo describir los mecanismos en el proceso de secado y rehidratación de rodajas de papa amarilla (*Solanum tuberosum*) var. Yaramango causadas por la rehidratación asistida con ultrasonido. Para eso, las rodajas de papa de 3 - 5 mm de espesor se pretrataron durante 30, 45 y 60 minutos usando un baño ultrasónico (24 kHz). El proceso de secado convectivo se realizó a 40 y 60 ° C, mientras que el proceso de rehidratación se realizó a 23 ° C. Se optimizó el proceso de rehidratación de las rodajas de papa asistidas con ultrasonido. El modelo de Page mostró un mejor ajuste y se utilizó para describir la cinética de secado. Mientras que el modelo de Peleg fue utilizado para describir el proceso de rehidratación de las rodajas de papa pre-tratadas. El diseño de Plackett - Burman usado para seleccionar variables significativas en el proceso de rehidratación concluyó que tanto la temperatura como el diámetro de las rodajas de papa influyen ($p < 0.05$) en el proceso de rehidratación. El proceso de optimización sugiere que la temperatura de ultrasonido tiene un mayor efecto en el proceso de rehidratación comparado con el diámetro de la rodaja de papa, sin embargo, la interacción de ambas variables genera un mayor impacto en la cantidad de agua absorbida. Se concluye entonces que el proceso de ultrasonido favorece el proceso de rehidratación de las rodajas de papa, y que futuros trabajos podrían intentar extender el uso de la tecnología para nuevos productos peruanos nativos.

ABSTRACT

The objective of this work was to describe the mechanisms involved in the improvement of the drying and rehydration of yellow potato slices (*Solanum tuberosum*) var. Yaramango caused by pretreatment with ultrasound. For this, the potato slices of 3 - 5 mm thick were pretreated for 30, 45 and 60 minutes using an ultrasonic bath (24 kHz). The convective drying process was carried out at 40 and 60 ° C, while the rehydration process was carried out at 23 ° C. The optimization process of rehydration of the slices of potatoes with ultrasound was studied. The Page model showed a better fit and was used to describe the drying kinetics. While the Peleg model was used to describe the rehydration process of the pre-treated potato slices. In addition, it was found that the drying temperature at 60 ° C enhances the effect of ultrasound, so the combination of both parameters could reduce time, and therefore costs, during the drying process. Ultrasound, when applied for long periods, improves drying and the additional rehydration rate at low temperatures, due to tissue damage. The design of Plackett - Burman used to select significant variables in the process of rehydration concluded that both the temperature and the diameter of the slices of potatoes influence ($p < 0.05$) in the rehydration process. The optimization process suggests that the temperature has a greater effect on the rehydration process compared to the diameter of the potato slice, however, the interaction of both variables generates a greater impact on the amount of water absorbed. It is concluded that the ultrasound process favors the process of rehydration of potato slices, and that future work could try to extend the use of technology for new native Peruvian products.

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la papa es el principal cultivo de la sierra, de los grandes y pequeños productores, siendo una importante fuente de ingresos económico, usado como alimento diario e incluso contribuyendo a la preservación de las costumbres ancestrales (Ordinola, 2011).

Las papas nativas han conservado un perfil tradicional en el ámbito rural andino, y son casi desconocidas en las urbes. En los últimos años, las papas nativas han salido hacia mercados industrializados. Por su exquisitez y alto valor nutritivo, son consideradas como un producto gourmet, consiguiendo precios por encima de las papas blancas y amarillas comerciales. Las papas nativas se convierten así en un producto con gran potencial para el desarrollo económico y social de los agricultores altoandinos de pequeña escala y sus comunidades, así como para la conservación activa de la biodiversidad (Chávez, 2008).

De acuerdo a la Asociación de Exportadores (Adex), Estados Unidos sigue constituyéndose el principal comprador de papa, seguido de Japón y España. Las exportaciones de papas nativas en todas sus presentaciones: snacks, congelada, deshidratada y fresca, en 2015 el monto llegó a US\$ 2.5 millones, vendiéndose cortadas en trozos o rodajas, trituradas o pulverizadas o en diversas presentaciones, como papa seca deshidratada y chuño, las que sumaron US\$ 47,855, representando el 48% del total exportado. Por lo que esta investigación ayuda a dar iniciativa para la producción, el cual ayudara a cubrir la demanda en nuestro país. Este proyecto se elaboró para dar una nueva tentativa y crear nuevos proyectos, que a partir de este trabajo se tenga evidencias de cuál es el efecto del ultrasonido en el proceso de hidratación.

A pesar de que existen muchos estudios sobre los derivados de papa u otros tubérculos en: almidón, chips, osmodeshidratados, secos en rodajas, entre otras, no hay estudios que

vinculen el fenómeno de rehidratación de las rodajas de papa. Sin embargo algunos estudios muestran esta transferencia de masa en otros productos, entre tubérculos, frutas y vegetales; que dan cabida a posteriores investigaciones acerca de la papa (Ceballos-Ortiz & Jiménez-Munguía, 2012) (Rocca & Mascherone, 2011).

La rehidratación es la propiedad que tiene cada producto alimenticio para ser reconstituido en algún líquido rehidratante, es decir es la capacidad de las células del alimento para absorber un líquido rehidratante, dándose durante el proceso fenómenos de transferencia de materia, cambios en las propiedades nutricionales y sensoriales; la velocidad de rehidratación depende de la temperatura, a mayor temperatura mayor velocidad de rehidratación y menor tiempo (Marín, Lemus, Flores, & Vega, 2006)

Hoy en día, muchos alimentos deshidratados sirven de base para el desarrollo y formulación de nuevos productos, ya que estos al ser fuentes de proteínas, vitaminas, minerales, fibra y antioxidantes, son considerados como componentes o ingredientes de alimentos funcionales (Rojas & Augusto, 2018a). Es por ello que resulta importante mejorar el consumo de alimentos deshidratados a través de la correcta rehidratación de estos alimentos, ya sean enteros, en trozos o pulverizados, para poder ser o no cocinados y posteriormente consumidos.

Varios autores proponen que la rehidratación se puede considerar como una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación, considerándose como un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado con o sin pretratamiento al secado. En algunos casos, la velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto deshidratado, siendo en alimentos deshidratados en condiciones óptimas, las que se deterioran menos y se rehidratan de forma normal. Existen pretratamientos que contribuyen a mantener la

integridad de los tejidos y evitan mayores pérdidas de sólidos solubles hacia el medio de rehidratación (Ricca, Rojas, Miano, Siche, & Duarte-Augusto, 2016).

El ultrasonido es una de las tecnologías actualmente estudiadas debido a las contracciones y expansiones que ocasiona en el tejido del alimento además de la cavitación y formación de microcanales, facilita la migración de agua, mejorando la cinética de hidratación y por ende reduciendo el tiempo y los costos de energía involucrados (Miano & Augusto, 2018). Sin embargo, no se ha encontrado estudios que evalúen el efecto del ultrasonido en el proceso de rehidratación de papa.

Por eso, el objetivo de este estudio fue optimizar el proceso de rehidratación de papa asistiendo el proceso con ultrasonido. Además, se modeló la cinética de rehidratación en rodajas de papa (*Solanum tuberosum*) asistida con ultrasonido.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Papa

La papa, es una de las plantas de mayor diversidad genética en el mundo, y el Perú cuenta con 8 especies domesticadas y más de 3000 variedades de las 5000 existentes en Latinoamérica. También posee 91 de las 200 especies silvestres del continente, y que generalmente no son comestibles por su sabor amargo y alta toxicidad. Entre las principales variedades tenemos: la papa canchán, tomasa, amarilla, huayro, tarmeña, huamantanga, peruanita, perricholi, coctel, entre otras (MINAG, 2011).

La mayor diversidad genética de la papa (*Solanum Tuberosum*) cultivada y silvestre se encuentra en las tierras altas de los Andes de América del Sur. La primera crónica conocida que menciona la papa fue escrita por Pedro Cieza de León en 1538. Cieza encontró tubérculos que los indígenas llamaban “papas” primero en la parte alta del valle del Cuzco, Perú y posteriormente en Quito, Ecuador. El centro de domesticación del cultivo se encuentra en los alrededores del Lago Titicaca, cerca de la frontera actual entre Perú y Bolivia.

La calidad y cantidad de las sustancias nutritivas del tubérculo varían por variedades de papa y condiciones de campo. El contenido de agua en un tubérculo fresco varía entre 63% a 87%; de hidratos de carbono, 13% a 30% (incluyendo el contenido de fibra 0.17% a 3.48%) de proteínas 0.7% a 4.6%; de grasas entre 0.02% a 0.96%; y de cenizas, 0.44% a 1.9%. Los otros constituyentes básicos son azúcares, ácido ascórbico y vitaminas.

La papa pertenece a las siguientes categorías taxonómicas:

Familia : Solanaceae

Género : Solanum

Subgénero : Potatoe

Sección : Petota

Serie : Tuberosa

La papa es una dicotiledónea herbácea con hábitos de crecimiento rastrero o erecto, generalmente de tallos gruesos y leñosos, con entrenudos cortos. (Pumisacho Manuel, 2002).

2.2. Ultrasonido

Los ultrasonidos son ondas sonoras que resultan inaudibles para el hombre por su elevada frecuencia. Al atravesar los medios líquidos las ondas sonoras producen la denominada “cavitación”: generan ciclos alternativos de compresión y expansión, como consecuencia, la aparición de burbujas de gas en la masa del líquido. En sucesivos ciclos, las burbujas crecen, alcanzan un tamaño crítico y, al superarlo implosionan. Al chocar entre si las moléculas de líquido, como consecuencia del colapso se producen ondas de presión que se transmiten por el medio disgregando la materia en suspensión. (Gil Ángel, 2010)

2.3. Ultrasonido en Procesamiento de Alimentos

Contreras, 2014, Afirma “La aplicación de ultrasonidos de potencia aceleró el proceso de secado, con reducciones del tiempo de secado de hasta 81.5%, al mejorar el transporte difusivo. Además, cuanto mayor fue la potencia acústica aplicada, mayor fue la velocidad de secado. En cuanto a la capacidad de rehidratación, las

muestras deshidratadas a -10 °C rehidrataron más y a una velocidad más elevada, adquiriendo una textura más blanda. No se observó ninguna influencia de la aplicación de ultrasonidos en la rehidratación ni en la textura. La capacidad antioxidante y el contenido en compuestos fenólicos total de la manzana deshidratada no se vieron afectados por las distintas condiciones de secado ensayadas. Por lo tanto, la aplicación de ultrasonidos de potencia no implicó una reducción de calidad de la manzana deshidratada”.

La tecnología del Ultrasonido ha sido empleada en diferentes investigaciones de la industria de alimentos y existe un gran interés en ello, debido a que se puede aplicar de forma práctica, con equipo seguro y sobre todo puede considerarse ambientalmente sustentable.

2.4. Efectos del Ultrasonido

El efecto conservador del ultrasonido está asociado a los fenómenos complejos de cavitación gaseosa, que explican la generación y evolución de microburbujas en un medio líquido. La cavitación se produce en aquellas regiones de un líquido que se encuentran sometidas a presiones de alta amplitud que alternan rápidamente. Durante la mitad negativa del ciclo de presión, el líquido se encuentra sometido a un esfuerzo tensional y durante la mitad positiva del ciclo experimenta una compresión. El resultado es la formación ininterrumpida de microburbujas cuyo tamaño aumenta miles de veces en la alternancia de los ciclos de presión. Las microburbujas que alcanzan un tamaño crítico implosionan o colapsan violentamente para volver al tamaño original. La implosión supone la liberación de toda la energía acumulada, ocasionando incrementos de temperatura instantáneos y focales, que se disipan sin que supongan una elevación sustancial de la temperatura del líquido tratado. Sin embargo, la energía liberada, así como el choque mecánico asociadas al fenómeno

de implosión, afectan la estructura de las células situadas en el microentorno. Se considera que dependiendo de la frecuencia empleada y la longitud de las ondas de sonido, se pueden generar diferentes cambios físicos, químicos y bioquímicos que pueden emplearse en un sinnúmero de aplicaciones en los diferentes campos industriales (Herrero y Romero, 2006).

2.5. Secado

El secado actual y tradicional se realiza mediante aire caliente forzado, lo cual es razonablemente económico; sin embargo, la eliminación de la humedad interior toma un tiempo relativamente largo, además las altas temperaturas pueden dañar atributos como color, sabor y valor nutricional del alimento. La aplicación de ondas acústicas o energía vibracional puede estimular la deshidratación y de esta manera disminuir el daño provocado por altas temperaturas del proceso convencional. Esencialmente se considera que la difusividad entre los sólidos suspendidos y el líquido es acelerada por efecto del campo ultrasónico de manera que la transferencia de calor puede incrementarse desde 30 a 60%, dependiendo de la intensidad del ultrasonido (Gallego-Juárez, 1998).

Mason (1998), ha reportado que entre las nuevas Tecnologías emergentes la deshidratación ultrasónica es bastante promisoría debido a que los efectos que produce se obtienen a temperaturas más bajas que las tradicionales, logrando menor degradación del alimento.

El uso de la tecnología de ultrasonido como pretratamiento para el secado con aire caliente ha sido un tópico interesante, tanto para el secado de lecho fluidizado como para el deshidratado osmótico (García-Pérez et al., 2009, Simal et al., 1997).

En el caso de hortalizas se ha usado el ultrasonido como pretratamiento antes del secado. En términos generales se produce una reducción en las siguientes etapas de secado convencional o liofilizado y también en los procesos de rehidratación (Jambrak et al. ,2007).

Específicamente en el secado de zanahorias, De la Fuente-Blanco et al., (2006), probaron un nuevo prototipo multimuestras que emplea frecuencias de 20 KHz y potencia de 100W, para estudiar los efectos mecánicos y térmicos durante el secado en muestras de zanahoria. Se observaron fuertes efectos por ultrasonido en comparación con las muestras sin empleo de ultrasonido, logrando reducción de tiempo para llegar a contenidos de humedad bajos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materia prima

Se utilizó como materia prima a la papa amarilla (*Solanum tuberosum*) var. Yaramango que fue adquirida del mercado local (Mercado Hermelinda). La papa fue lavada, pelada y cortada en rodajas de diferentes diámetros (45-65mm) y espesores (3-5mm); éstos pasaron por una solución de bisulfito sódico (5% p/p) para evitar su pardeamiento enzimático. Todas las papas cortadas fueron utilizadas el mismo día.

3.2. Pre-tratamiento con ultrasonido

Una masa de aproximadamente 100 gr (10 rodajas de papa) fue colocada dentro del baño de ultrasonido modelo VICEDO (España), fijado a una frecuencia sónica de 24KHz; y un volumen de 1 litro de agua destilada. Las rodajas de papa estaban cubiertas con una red de metal para evitar que la muestra a flote. La muestra de control se definió como las rodajas sin tratamiento de ultrasonido. Las otras muestras fueron sonicadas durante 30, 45 y 60 minutos de tiempos de procesamiento ultrasónico. Durante el proceso de sonicación, el agua de tina aumentaba su temperatura como producto de la cavitación, por lo cual, el agua de la tina se cambiaba 3 veces para estandarizar el proceso (23 °C). Después del procesamiento, las rodajas se retiraron del baño ultrasónico y se secaron con toallas de papel para eliminar el exceso de agua superficial, y luego se secaron. Todos los tratamientos se llevaron a cabo por triplicado.

Para evaluar si la formación de microcanales o la incorporación de agua es la principal causa de la mejora del proceso de secado, todos los tratamientos sonicados y el control fueron secados a 40 °C y 60° C y se comparó la velocidad de secado.

3.3. Secado y rehidratación

3.3.1. Secado

El secado fue realizado en una estufa de aire convectivo modelo UF55 (Memmert, Alemania) a 40 °C y 60 °C, las rodajas de papa fueron colocadas sobre una red metálica para permitir la libre circulación de aire caliente por toda la superficie de las muestras. Durante el proceso de secado se fueron tomando los pesos de las muestras cada 5 minutos durante los primeros 20 minutos, luego cada 10 minutos hasta los 40 minutos y a partir de ahí cada 20 minutos hasta alcanzar un peso constante. El proceso de secado, para cada temperatura, se realizó por triplicado. La humedad en cada momento se obtuvo por balance de masa, teniendo en cuenta la humedad inicial. El contenido de humedad inicial se midió colocando muestras de 5 gr. de papa a 105 ° C usando un analizador de humedad infrarrojo (AND Mx50, Japón).

3.3.2. Rehidratación

Luego del secado, fue evaluada la rehidratación de las muestras de papa, a fin de comparar su comportamiento y comprobar el efecto de las alteraciones estructurales producidas debido al uso de la tecnología de ultrasonido en el proceso de hidratación.

El proceso de rehidratación fue realizado durante 85 minutos y se fueron tomando pesos cada 5 minutos durante los primeros 25 minutos, luego cada 10 minutos hasta los 85 minutos. El modelo empleado para describir el comportamiento de los datos experimentales durante el proceso de rehidratación fue el modelo matemático de Peleg (2), debido a que estos mostraron un comportamiento en forma cóncava hacia abajo. Los parámetros del modelo

fueron obtenidos mediante regresión no lineal empleando el software Statistica 12,0 (Statsoft), con un nivel de significancia de 95%.

DIAGRAMA DE FLUJO

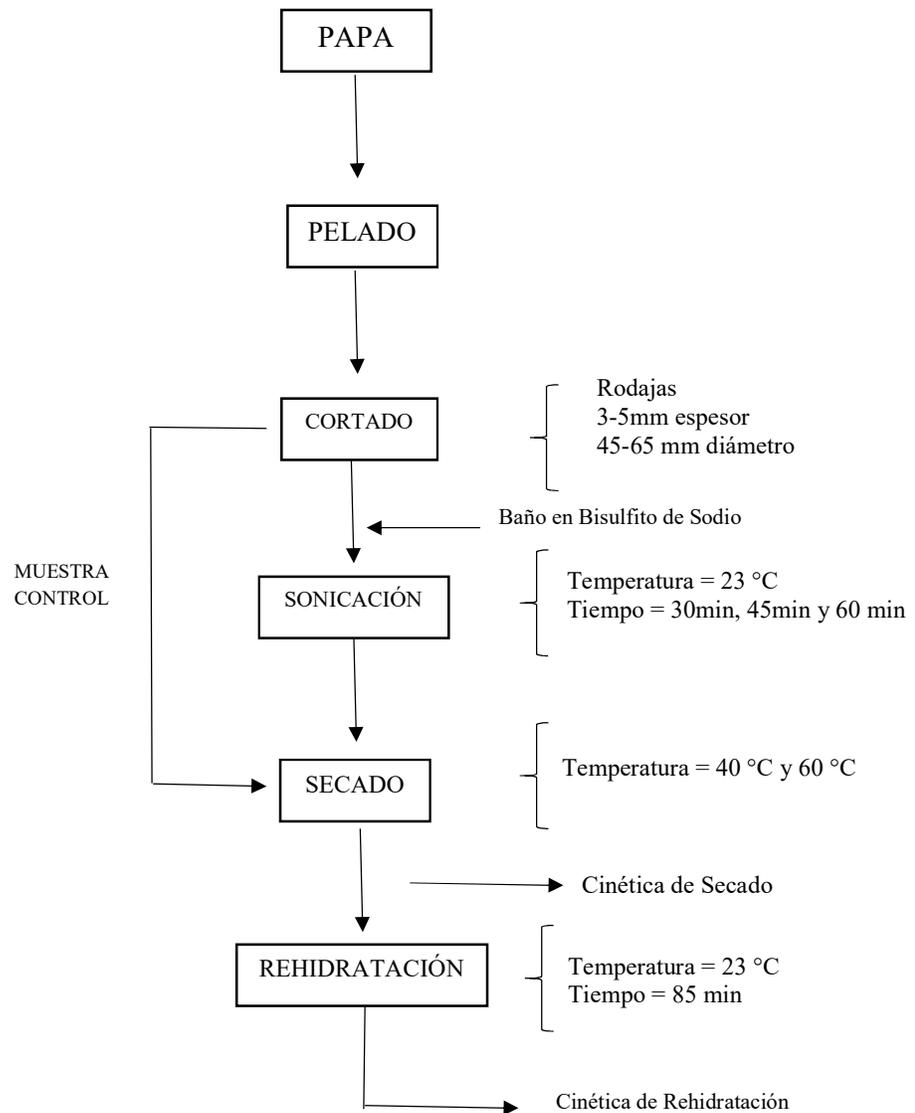


Figura 1. Cinética del Secado y Rehidratación

3.4. Modelamiento Matemático

Tanto la cinética de secado como la de rehidratación de todas las muestras, con los diferentes tratamientos, se evaluaron utilizando modelos matemáticos apropiados.

3.4.1. Modelamiento Matemático del secado

Para determinar el mejor modelo para describir el comportamiento cinético de secado, fueron evaluados cuatro modelos matemáticos empíricos (Tabla 1). Estos fueron seleccionados considerando su simplicidad y uso expresivo en la literatura.

Tabla N° 1 Modelos Matemáticos Empíricos

Modelo	Ecuación	Referencia
Page	$MR = \text{Exp}(-k.t^n)$	(Page, 1949)
Henderson & Pabis	$MR = MR_0 \cdot \text{Exp}(-k.t)$	(Henderson, 1961)
Lewis (First order)	$MR = \text{Exp}(-k.t)$	(Lewis, 1921)
Two terms	$MR = a \cdot \text{Exp}(-k.t) + (1-a) \text{Exp}(-k.a.t)$	(Sharaf-Eldeen, Blaisdell, & Hamdy, 1980)

Donde MR es la relación de humedad adimensional, k es la constante de velocidad de secado, t es el tiempo de secado, n y a son constantes de secado adimensionales y M_0 es la humedad inicial en base seca.

3.4.2 Modelamiento matemático de rehidratación

Para el modelado matemático de la transferencia de materia (agua) ocurrida durante el proceso de rehidratación de un alimento deshidratado utilizamos el modelo de Peleg (Ecuación 1) que se ajusta los datos experimentales de humedad en función del tiempo. En la mayoría de los estudios realizados sobre la rehidratación de los alimentos, el modelo de Peleg es el más usado por presentar parámetros de importancia para la optimización de los procesos (Marín, Lemus, Flores & Vega. 2006).

$$\text{Peleg} \quad X_{wt} = X_0 + \left[\frac{t}{k_1 + k_2 \cdot t} \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde: X_{wt} es el contenido de agua a un determinado tiempo (g agua/g materia seca); t es el tiempo (minutos), X_0 es el contenido inicial de agua (g agua/g materia seca); k_1 y k_2 son constantes de cada modelo.

La bondad de la adaptación de los modelos se evaluó mediante el valor de regresión R^2 (coeficiente de determinación), los valores de la desviación de la raíz cuadrática media (RMSD, ecuación (2)).

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{experimental} - M_{modelo})^2}{n}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

3.5. Optimización del proceso de rehidratación

La optimización se realizó en tres etapas, los cuales comprenden en realizar el Screening (eliminación de las variables poco significativas), Escalamiento y finalmente la optimización final (obtención de la región óptima y los puntos óptimos) (Ayala y Pardo, 1995).

3.5.1. Screening de Plackett - Burman

En esta etapa de optimización se identificó las variables que tienen efecto significativo sobre el proceso. En esta etapa estudiamos 4 variables ($k=4$) utilizando 8 ensayos experimentales $N=2^{4-1} = 8$, teniendo como variables: Tiempo de ultrasonido, temperatura de ultrasonido, espesor y diámetro de corte de la rodaja de papa, teniendo como variable de respuesta el porcentaje de ganancia de agua. Las muestras fueron secadas a 40 °C hasta peso constante sin pretratamiento de ultrasonido.

Tabla N° 2 del Diseño Experimental de Plackett-Burman

N	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)
1	10	30	3	65
2	40	30	3	45
3	10	60	3	45
4	40	60	3	65
5	10	30	5	65
6	40	30	5	45
7	10	60	5	45
8	40	60	5	65
9	25	45	4	55
10	25	45	4	55

3.5.2. Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR)

Se realizó el diseño compuesto central rotatable (DCCR), para las variables significativas de Plackett y Burman en el proceso de optimización de la rehidratación de las rodajas de papa.

Tabla N° 3 Variables Significativas para el DCCR

Diámetro (mm)	Temperatura (°C)
48	14.4
62	14.4
48	35.6
62	35.6
45	25
65	25
55	10
55	40
55	25
55	25

3.6. Análisis Estadístico

Los datos se introdujeron al STATISTICA 7 para la validación de las variables en el Plackett - Burman y DCCR en la optimización final, así como de un análisis de superficie de respuesta para evaluar los rangos óptimos de las variables.

DIAGRAMA DE FLUJO

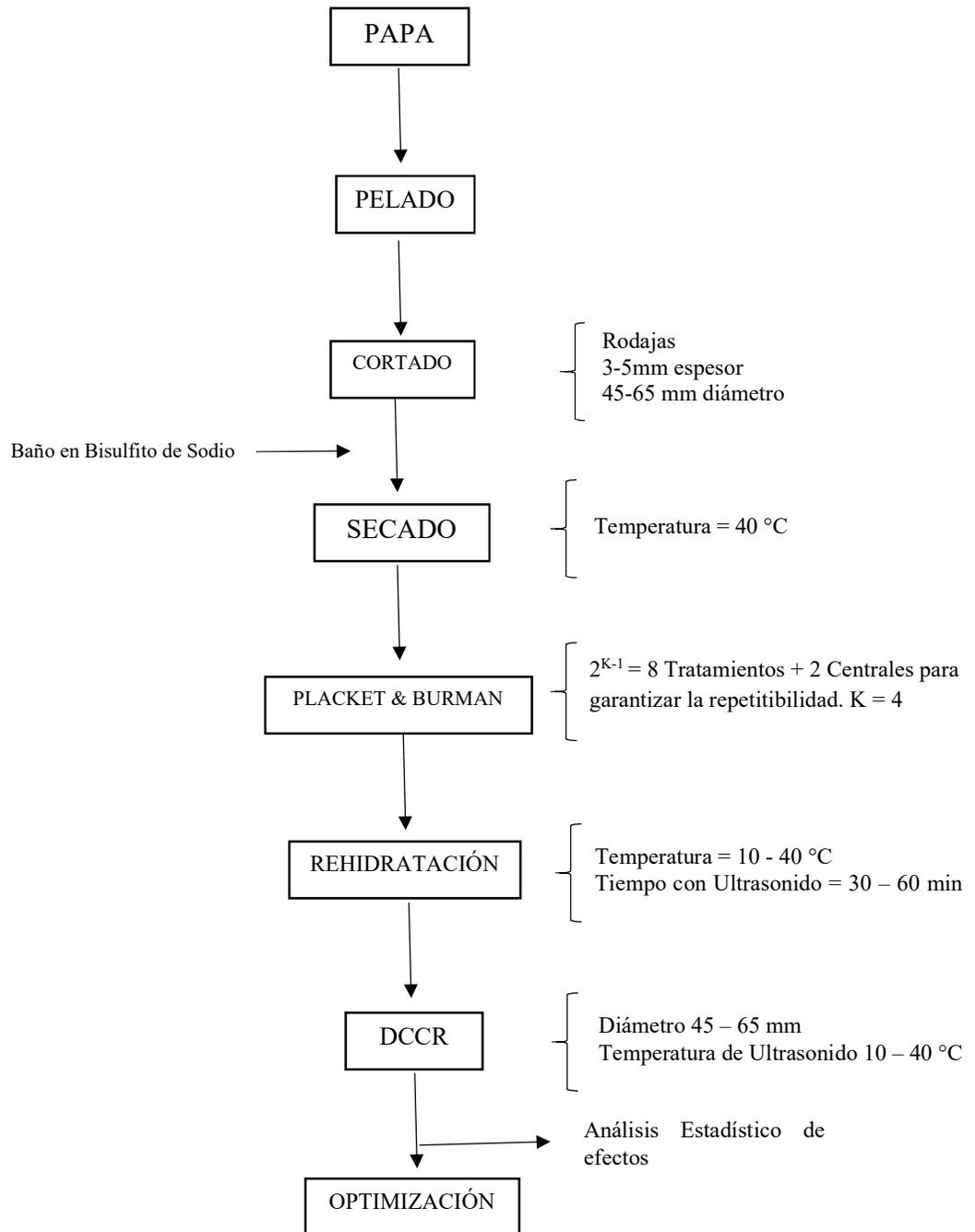


Figura 2. Proceso de Optimización.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto del ultrasonido en el secado

Las Figuras 3 y 4 muestran la pérdida de agua (%) en las muestras de rodajas de papa control y pre-tratadas con ultrasonido, secadas a 40 °C y 60 °C respectivamente. Como se observa, la eliminación de agua en las muestras pre-tratadas con ultrasonido es mayor que en las muestras sin pre tratamiento. También sugieren la influencia del ultrasonido es más notoria cuando la temperatura fue de 60 °C, comparada con la temperatura de 40 °C.

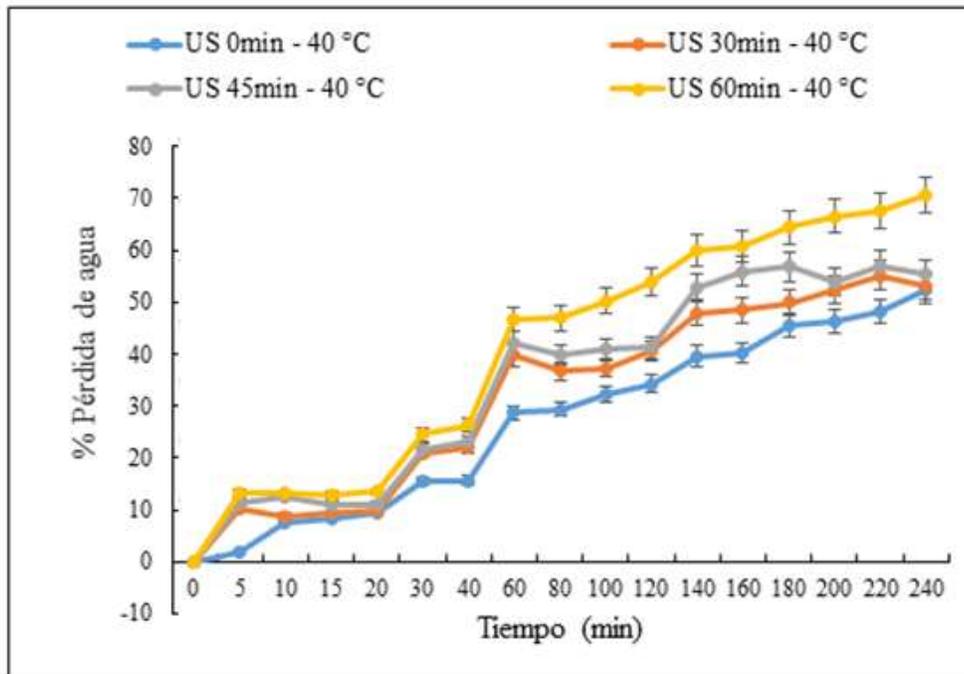


Figura 3. Porcentaje de pérdida de agua en la muestra control y las muestras pre-tratadas con ultrasonido secadas a 40 °C.

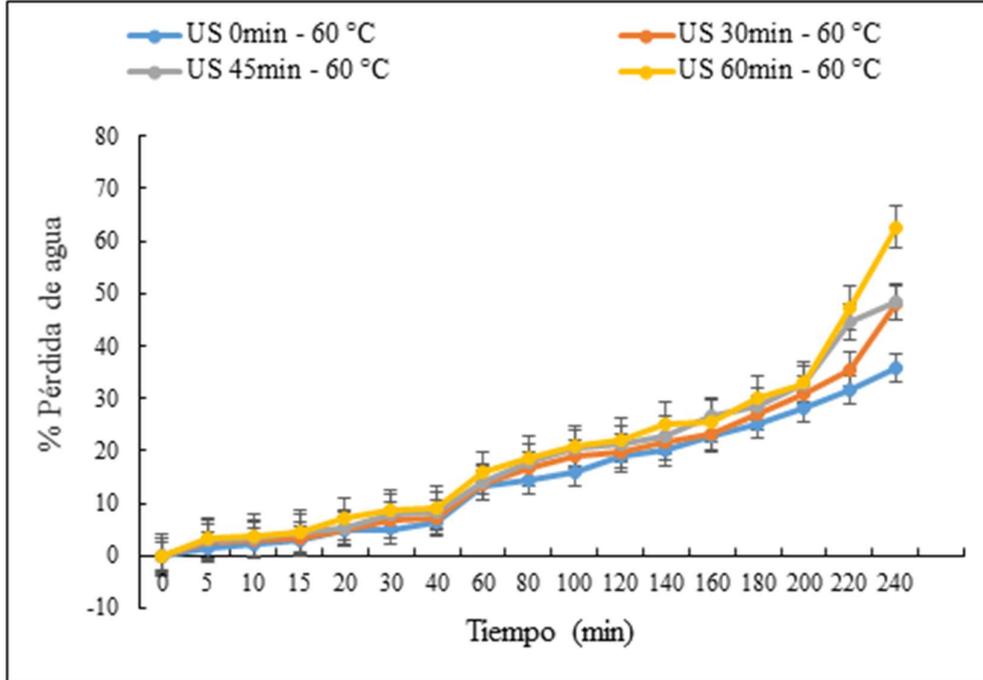


Figura 4. Porcentaje de pérdida de agua en la muestra control y las muestras pre-tratadas con ultrasonido secadas a 60 °C.

El secado generalmente se evalúa considerando un proceso difusional puro en una muestra isotrópica. Sin embargo, los materiales biológicos son anisotrópicos y sus elementos estructurales pueden afectar el flujo de agua durante el procesamiento (Rojas & Augusto, 2018b). En nuestro caso, todas las rodajas de papa pertenecían a la misma variedad y fueron tomadas de un mismo conjunto muestral, por lo que las variaciones en la pérdida de peso pueden ser tomadas como consecuencia directa del pre-tratamiento. Así, para un mismo tiempo de secado, las muestras pre-tratadas con ultrasonido evidenciaron niveles de pérdida de agua mayores comparadas con las muestras control (sin ultrasonido). Esto puede ocurrir porque, según Villamiel, García-Pérez, Montilla, Carcel y Benedito (2017), en el secado convectivo, el tejido vegetal continúa presentando células erectas con una pared celular definida y organizada, lo que dificulta la difusividad del agua. Mientras que el ultrasonido genera microcanales (Rojas & Augusto, 2018a), derivados de fenómenos de cavitación y del efecto esponja (series de compresiones y expansiones de la muestra) que da como resultado cambios de presión en el sólido que facilita la eliminación de agua (Başlar et al., 2014). Por lo tanto, la metodología de secado con pre-tratamiento de ultrasonido resultó ser la más efectiva para obtener una mayor tasa de pérdida de agua. Esta nueva metodología de secado aplicando pretratamientos con ultrasonido fue probada por Tekin et al. (2017), que obtuvo una mayor tasa de secado de judías verdes en comparación con el secado al vacío bajo las mismas condiciones de procesamiento. Además, cuando se probó con carne de res y pollo y filetes de salmón y trucha, también se obtuvieron resultados positivos, en los que el ultrasonido produjo una mayor tasa de secado en comparación con el vacío y secado en horno (Başlar et al., 2014; Başlar et al., 2015). Chen et al. (2016) documentaron un período de secado más corto para las zanahorias con el uso

de ultrasonido cuando se secaron a 65 ° C, que era aproximadamente 1.8 veces más rápido que las técnicas de secado al vacío.

Diversos investigadores en sus publicaciones mencionan que la aplicación de ultrasonidos mejora la transferencia de masa. Simal et al. (1998) compararon experimentos de deshidratación osmótica de cubos de manzana en una solución de sacarosa 70 °Brix a temperaturas que varían de 40 a 70 °C y reportaron un aumento de 14-27% en la pérdida de agua cuando se aplicó ultrasonido durante 3 horas en comparación con la pérdida de agua con agitación. De acuerdo con Taiwo et al. (2003), el tratamiento con ultrasonido durante 2 horas produjo un aumento del 10-43% en la pérdida de agua de las fresas deshidratadas osmóticamente en comparación con el tratamiento osmótico a la presión atmosférica. Indicaron también que la formación de los canales microscópicos influyó al aumento tanto de la pérdida de agua como de la ganancia sólida. Nowacka et al. (2012) informaron que el tratamiento con ultrasonido de las manzanas a una frecuencia de 35 kHz durante 10, 20 y 30 min produjo un aumento del 9-14% en la porosidad de la manzana en comparación con las muestras no tratadas.

Estos resultados confirmaron las observaciones de Fuente-Blanco et al. (2006) y Garcia-Noguera et al. (2010) que el tratamiento ultrasónico afecta el tejido del producto, facilitando la difusión del agua a través del tejido del producto. El menor aumento en la difusividad puede estar relacionado con el tamaño de los espacios celulares formados en el tejido de la papa, que eran de menor longitud, y con el contenido de almidón de las papas, ya que una gran cantidad de almidón favorece la absorción de agua, comportamiento que se ha informado anteriormente para frutas con alto contenido de almidón como sapotas (Fernández y Rodríguez, 2008).

Las características de las burbujas de cavitación de ultrasonido se modelaron y correlacionaron con la disrupción acústica de las células de microalgas. De este modo, los estudios futuros pueden incorporar los parámetros ultrasónicos en el modelo de difusión cuando se trata de modelar los procesos de secado mejorados por ultrasonido.

4.2. Modelamiento del secado

Existe una gran variedad de modelos matemáticos expuestos en la literatura para describir el proceso de secado (Kilic, 2016), cada uno con sus ventajas y limitaciones. Por lo tanto, se realizó una evaluación del modelo matemático más apropiado para describir el secado convectivo de las muestras de papa. En primer lugar, se realizó una selección de modelos basada en criterios tales como simplicidad, descripción menos empírica y uso en la literatura. Por ejemplo, es importante mencionar que este trabajo no ha considerado el uso de la Ley Fick (Agutter, Malone, & Wheatley, 2000; Fick, 1855) porque la transferencia de masa durante el proceso de secado no es simplemente un proceso difusional, sino que también involucra capilaridad. La Tabla 1 muestra los parámetros de los modelos de Page (n y k), Henderson (M_0 y k), Lewis (k) y Two-terms (a y k) que fueron obtenidos por el modelamiento de la pérdida de agua (% agua en base seca) con el tiempo. Los modelos fueron evaluados según su ajuste (R^2) y su error (RMSD).

De acuerdo con los valores obtenidos de los parámetros k , n , RMSD y R^2 , todos los modelos evaluados descritos presentan datos experimentales con $R^2 > 0.96$, " n " valores mayores a 1 y " k " cercanos a 0. Sin embargo, el modelo de Page mostró un ajuste mayor, con $R^2 = 0.9983$, valores " k " muy cercanos a 0, valores " n " cercanos a 1 y $RMSD = 0.0219$.

Tabla 4. Parámetros de las ecuaciones empíricas para el modelamiento del proceso de secado de las rodajas de papa pre-tratadas con ultrasonido

Tiempo		Page		Henderson		Lewis		Two-terms	
sonicación	Modelos								
(min)									
30 min	T = 60 °C	<i>k</i>	0.0042	<i>M₀</i>	1.0547	<i>k</i>	0.0116	<i>a</i>	1.7496
		<i>n</i>	1.2220	<i>k</i>	0.0124			<i>k</i>	0.0160
		RMSD	0.0219	RMSD	0.0363	RMSD	0.0426	RMSD	0.0222
		R ²	0.9983	R ²	0.9954	R ²	0.9968	R ²	0.9982
	T = 40 °C	<i>k</i>	0.0009	<i>M₀</i>	1.0235	<i>k</i>	0.0034	<i>a</i>	1.8112
		<i>n</i>	1.2698	<i>k</i>	0.0036			<i>k</i>	0.0056
		RMSD	0.0156	RMSD	0.0271	RMSD	0.0298	RMSD	0.0138
		R ²	0.9976	R ²	0.9908	R ²	0.9914	R ²	0.9979
45 min	T = 60 °C	<i>k</i>	0.0042	<i>M₀</i>	1.0547	<i>k</i>	0.0116	<i>a</i>	1.7496
		<i>n</i>	1.2220	<i>k</i>	0.0124			<i>k</i>	0.0160
		RMSD	0.7112	RMSD	0.7035	RMSD	0.7085	RMSD	0.0000
		R ²	0.9875	R ²	0.9788	R ²	0.9822	R ²	0.9872
	T = 40 °C	<i>k</i>	0.0042	<i>M₀</i>	1.0547	<i>k</i>	0.0116	<i>a</i>	1.7496
		<i>n</i>	1.2220	<i>k</i>	0.0124			<i>k</i>	0.0160
		RMSD	0.7112	RMSD	0.7035	RMSD	0.7085	RMSD	0.0000
		R ²	0.9724	R ²	0.9637	R ²	0.9680	R ²	0.9720
60 min	T = 60 °C	<i>k</i>	0.0042	<i>M₀</i>	1.0547	<i>k</i>	0.0116	<i>a</i>	1.7496
		<i>n</i>	1.2220	<i>k</i>	0.0124			<i>k</i>	0.0160
		RMSD	0.7112	RMSD	0.7035	RMSD	0.7085	RMSD	0.0000
		R ²	0.9908	R ²	0.9848	R ²	0.9876	R ²	0.9906
	T = 40 °C	<i>k</i>	0.0042	<i>M₀</i>	1.0547	<i>k</i>	0.0116	<i>a</i>	1.7496
		<i>n</i>	1.2220	<i>k</i>	0.0124			<i>k</i>	0.0160
		RMSD	0.7112	RMSD	0.7035	RMSD	0.7085	RMSD	0.0000
		R ²	0.9803	R ²	0.9723	R ²	0.9761	R ²	0.9800

Por otro lado, más allá de la estadística, se debe evaluar otra información relacionada con el ajuste de la curva del dato experimental (Figuras 3 y 4). Algunos modelos matemáticos muestran una importante falta de adaptación en regiones específicas del proceso. Otro factor importante a tener en cuenta es que, durante el pretratamiento con ultrasonido, la muestra está ligeramente hidratada; en consecuencia, la humedad adimensional inicial es más alta que las muestras no pre procesadas con ultrasonido. Resultados similares fueron encontrados en rodajas de zanahoria pre-tratadas con ultrasonido (Ricca, Rojas, Miano, Siche, & Augusto, 2016).

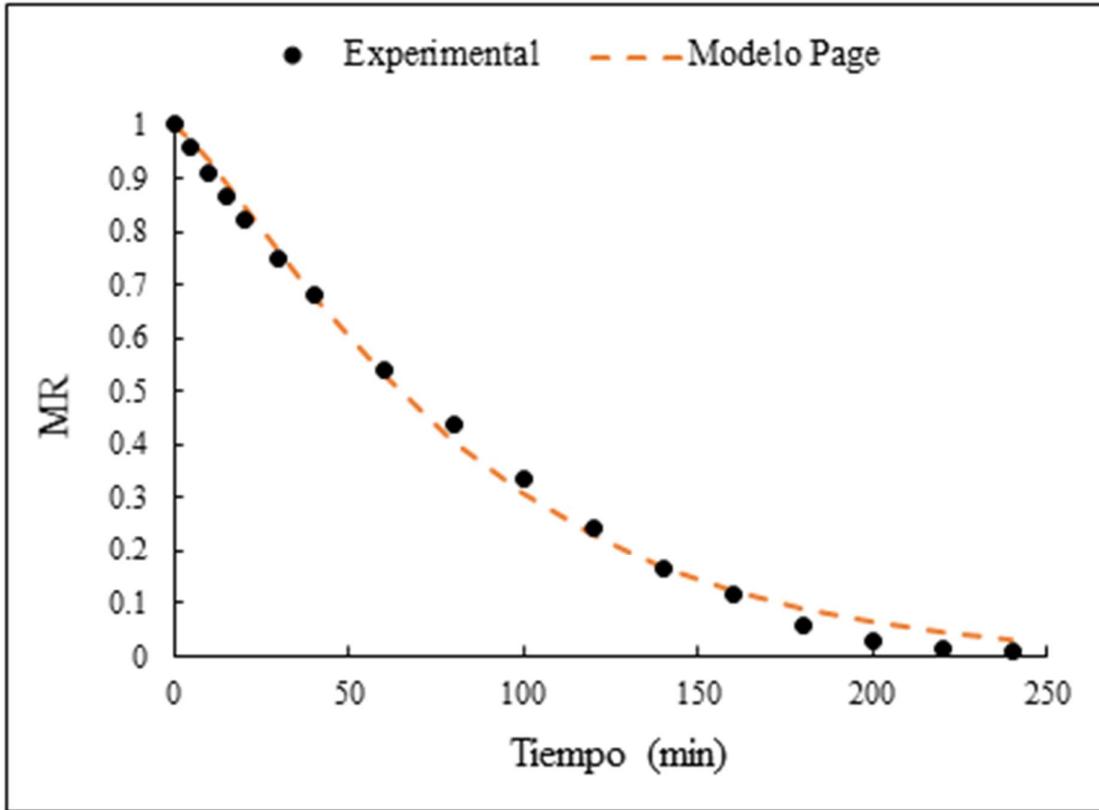


Figura 5. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Page

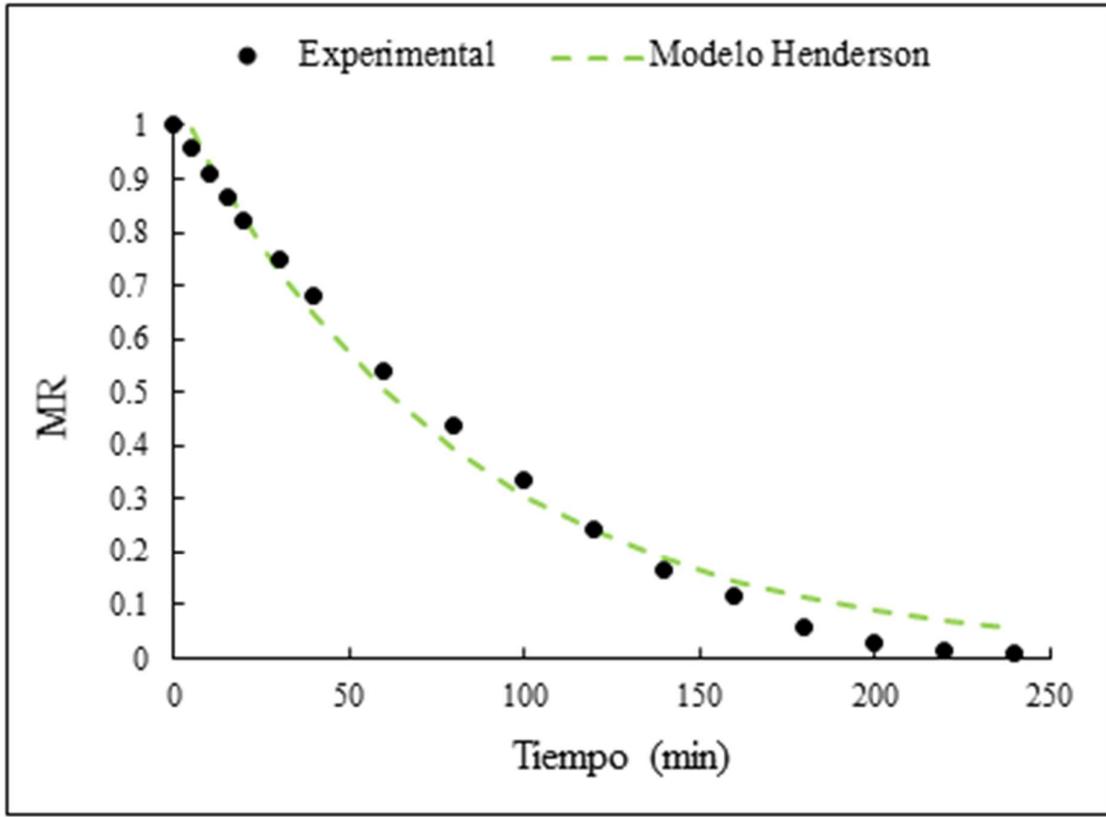


Figura 6. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Henderson

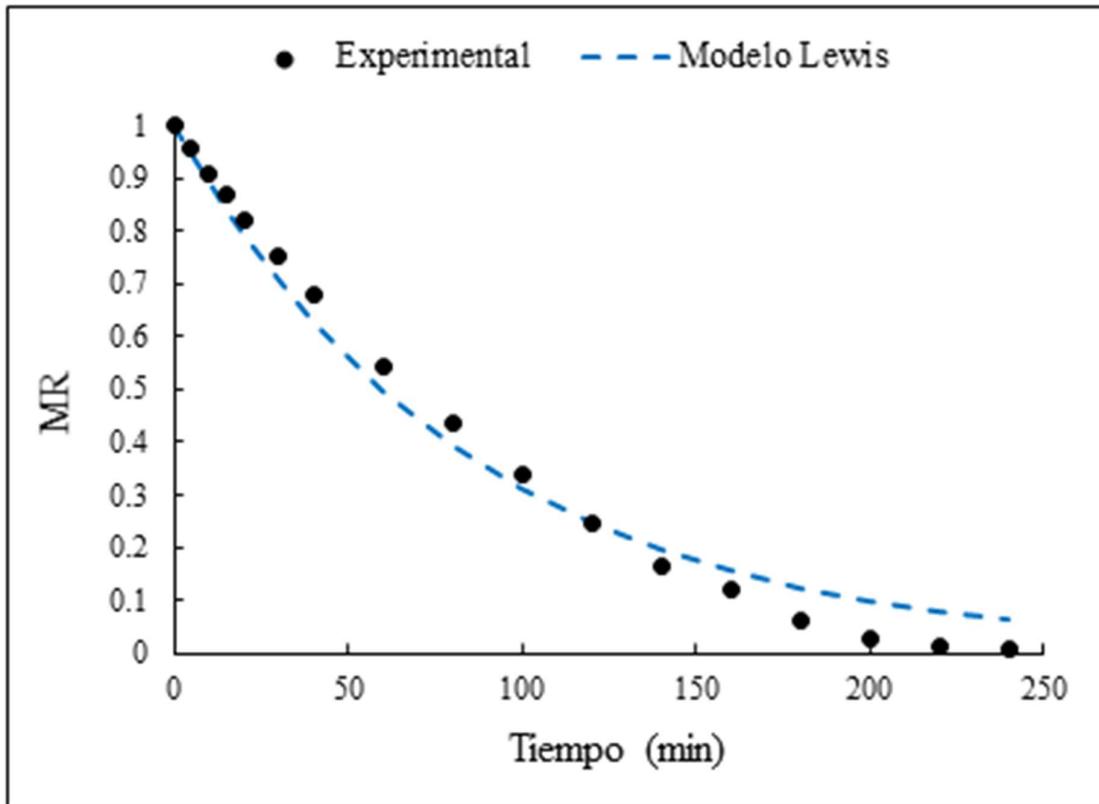


Figura 7. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Lewis

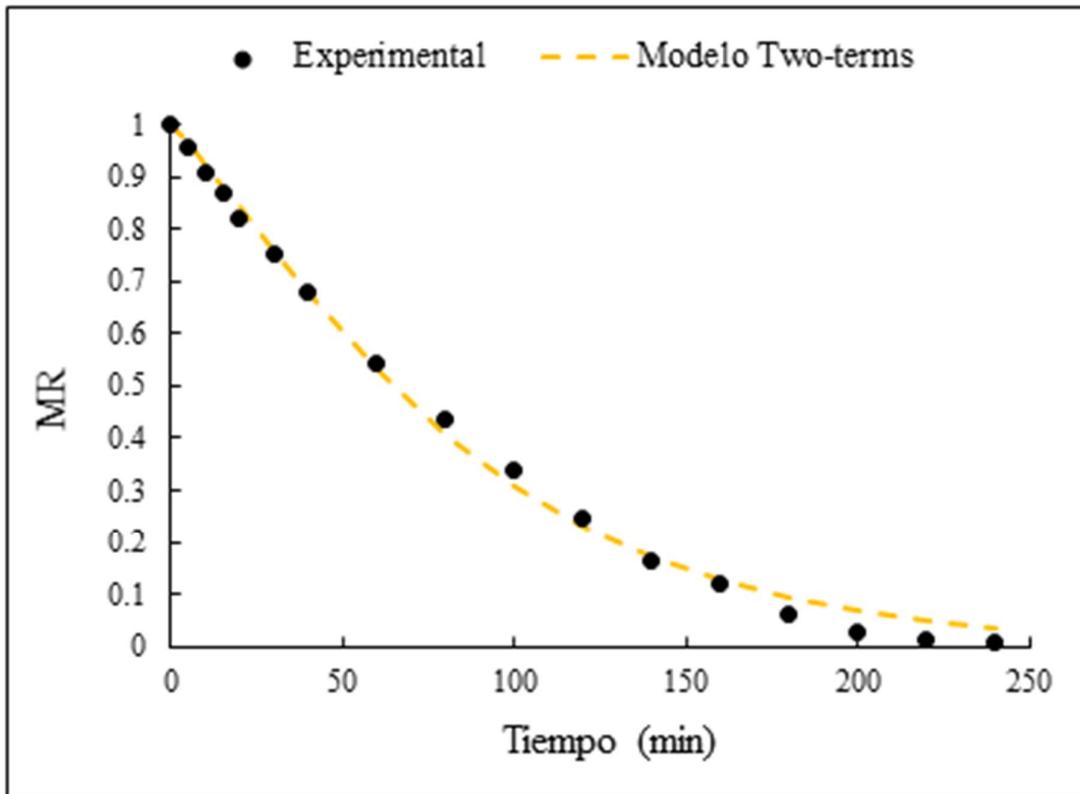


Figura 8. Modelamiento de la cinética de secado de las rodajas de papa. Modelo Two-terms.

4.3. Efecto del ultrasonido en la rehidratación

La rehidratación es un proceso que define uno de los parámetros de calidad más importantes para el secado de alimentos (Sumnu, Turabi y Oztop, 2005).

El tratamiento con ultrasonido ocasiona cambios irreversibles en la estructura del alimento, haciendo que su capacidad de absorción y retención de agua se reduzcan (Kumari S. Ojha, 2018). Es por eso que uno de los más importantes parámetros de calidad en alimentos secos es su capacidad de rehidratación (Sumnu et al., 2005). Sin embargo, a pesar de que existen en la bibliografía diversos estudios sobre la aplicación de ultrasonido como pre-tratamiento o tratamiento asistido al secado de alimentos, poco se sabe sobre el efecto del ultrasonido en el proceso de rehidratación.

Las Figuras 9 y 10 nos muestran que la rehidratación de las muestras sometidas a pretratamiento ultrasónico a los 30, 45 y 60 minutos fue mayor en comparación con las muestras no tratadas, lo que se puede atribuir a la mayor porosidad (Nowacka, Wiktor, Śledź, Jurek y Witrowa-Rajchert, 2012) y la formación de microcanales (Fernandes & Rodrigues, 2007; Fernandes et al., 2008a, 2008b). Esto permitió una mejor entrada de agua durante la rehidratación.

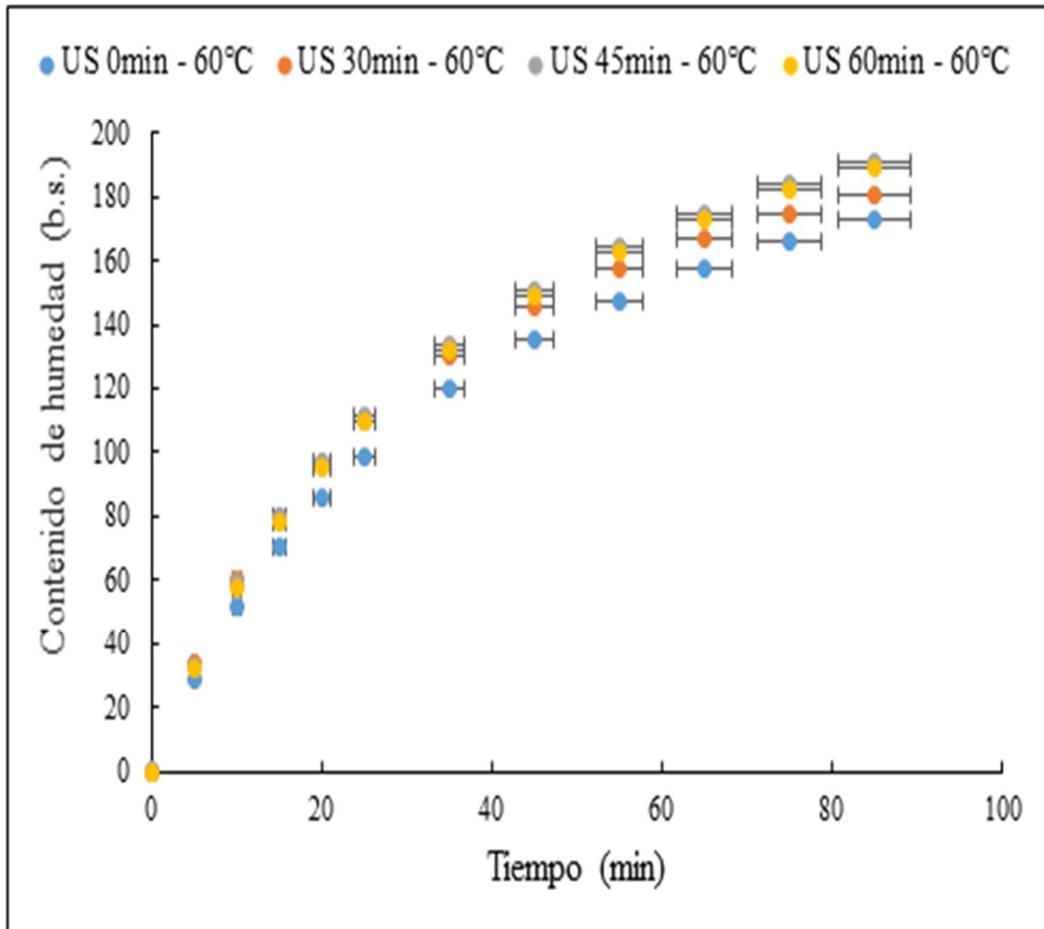


Figura 9. Ganancia de agua en la muestra control y las muestras pre-tratadas con ultrasonido secadas a 60 °C

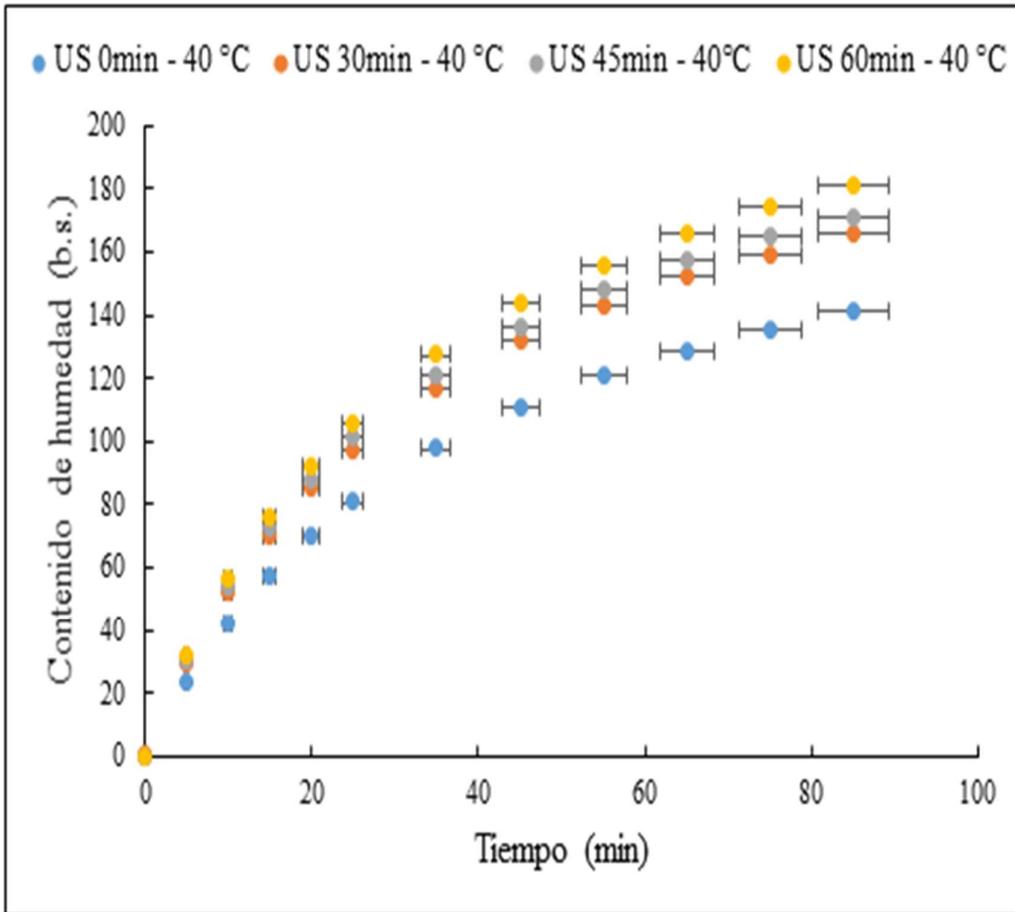


Figura 10. Ganancia de agua en la muestra control y las muestras pre-tratadas con ultrasonido secadas a 40 °C.

La tasa de rehidratación de las papas secadas a 60 °C, es más alta que las secadas a 40 °C. Esto muestra que, a altas temperaturas de secado, los daños estructurales son mayores o irreversibles que a temperaturas más bajas. Lo mismo ocurre cuando se utilizan intensidades de ultrasonidos más altas (Jambrak, Mason, Paniwnyk y Lelas, 2007). La Figura 11 muestra imágenes de las rodajas de papa secadas a 60 ° C sin pretratamiento con ultrasonidos (0min + 60°C) y muestras con 60 min de pretratamiento con ultrasonidos (60min + 60°C). En ambos tratamientos, se observa la contracción de las muestras después del proceso de secado.



Figura 11. Muestras de rodajas de papa después del secado.

(a) Rodajas de papa secadas a 60 ° C sin pretratamiento con ultrasonido (0min + 60°C).

(b) Muestras con 60 min de pretratamiento con ultrasonido (60min + 60°C)

Los datos de rehidratación experimental se modelaron utilizando el modelo de Peleg ($R^2 > 0.95$). Como se observa en las Figuras 12 a la 19, la tasa de rehidratación es mayor cuando la temperatura de secado al aire es de 60°C, lo que corrobora el efecto de la temperatura de secado sobre la tasa de rehidratación. Se obtuvieron resultados similares en hongos secados a 20°C y 70°C, donde el kI inferior se obtuvo de la cinética de rehidratación de las muestras secadas a 70 ° C (Hernando, Sanjuán, Pérez-Munuera, y Mulet, 2008). Estos resultados indican que la tasa de rehidratación está influenciada por los cambios estructurales producidos tanto por el proceso de ultrasonido como por el secado a temperatura. El efecto del pretratamiento con ultrasonido se ocultó cuando las muestras se secaron a 60 ° C ya que los cambios estructurales causados por esta condición de secado son mucho mayores que el efecto del ultrasonido.

° T Secado = 60 °C

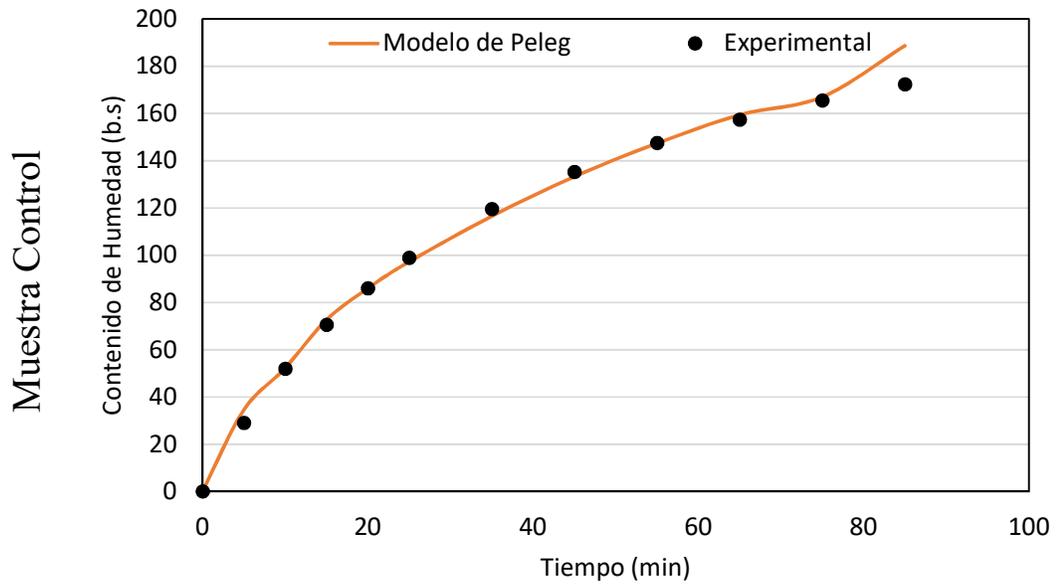


Figura 12. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 60 °C utilizando el modelo de Peleg.

° T Secado = 40 °C

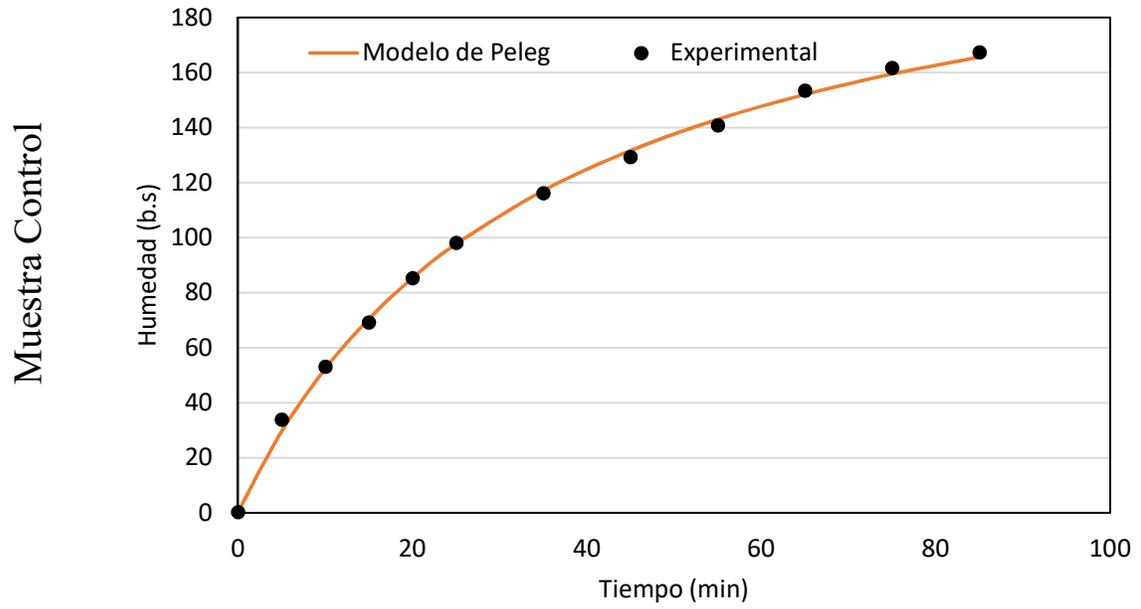


Figura 13. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 40 °C utilizando el modelo de Peleg.

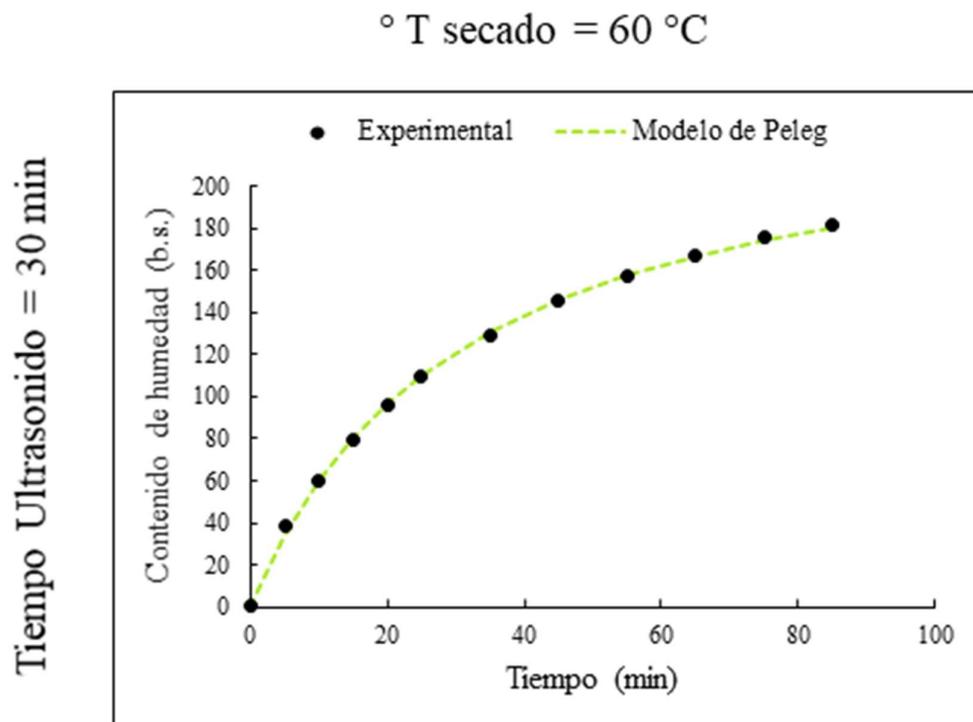


Figura 14. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 60 °C y 30 min de ultrasonido utilizando el modelo de Peleg.

° T secado = 40 °C

Tiempo Ultrasonido = 30 min

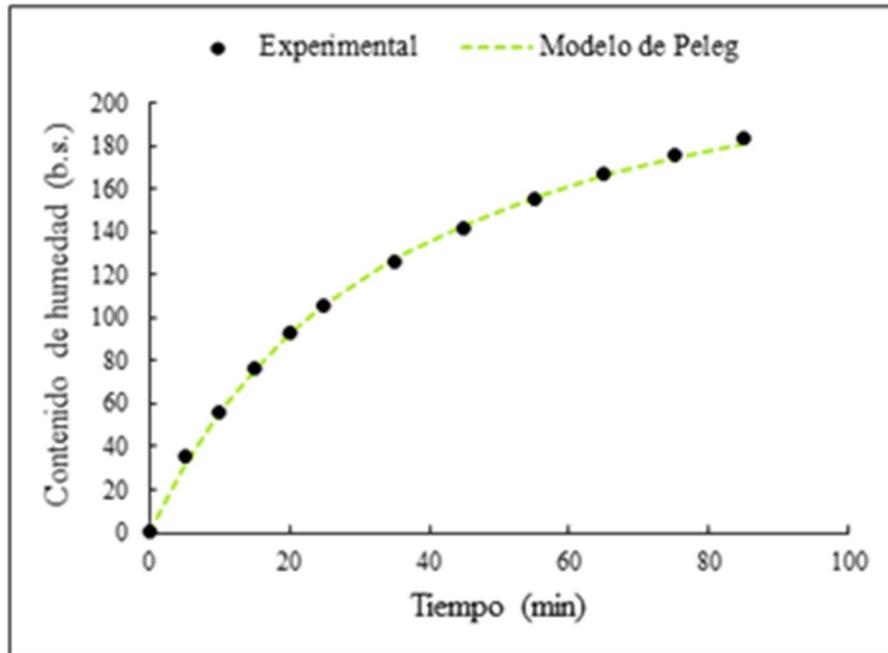


Figura 15. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 40 °C y 30 min de ultrasonido utilizando el modelo de Peleg.

° T secado = 60 °C

Tiempo Ultrasonido = 45 min

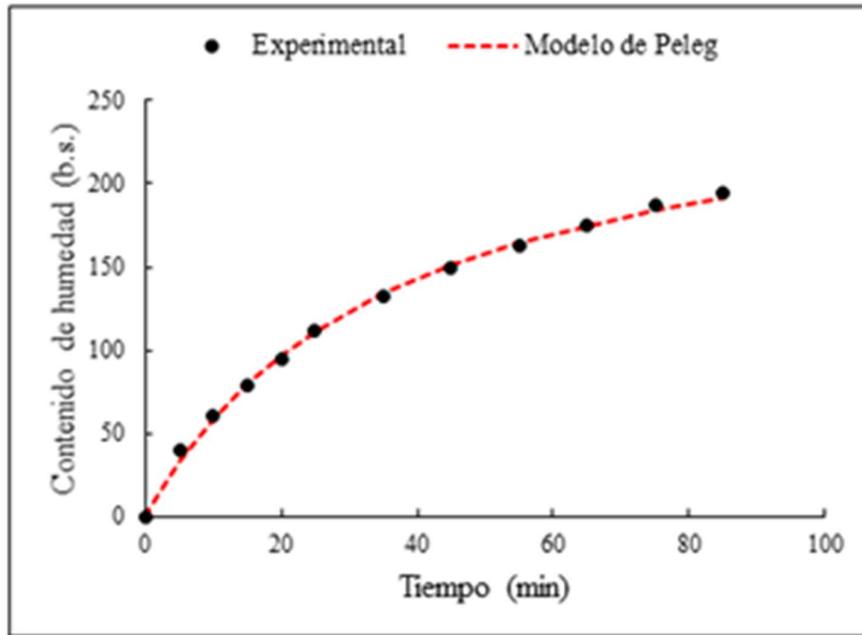


Figura 16. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 60 °C y 45 min de ultrasonido utilizando el modelo de Peleg.

° T secado = 40 °C

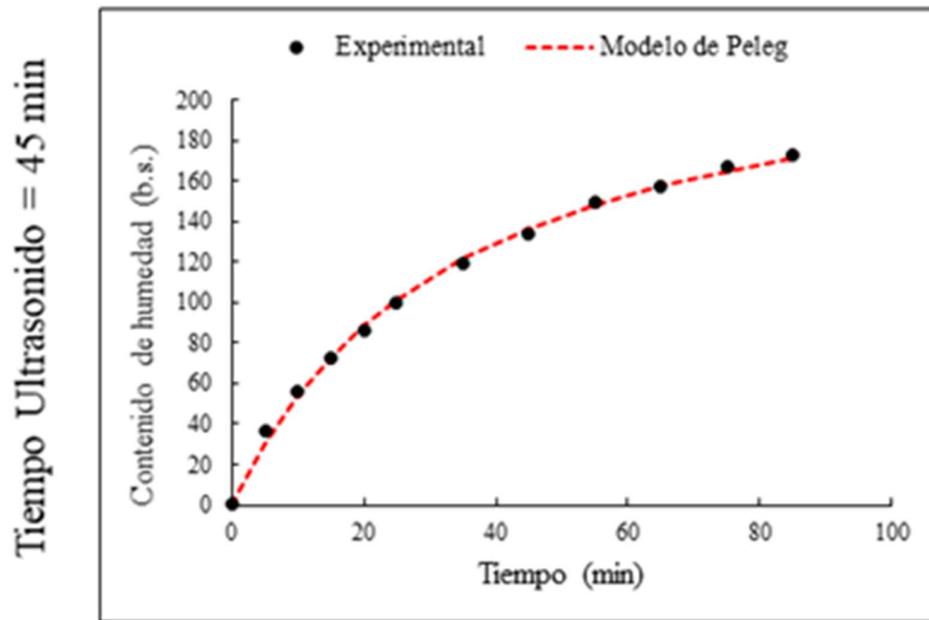


Figura 17. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 40 °C y 45 min de ultrasonido utilizando el modelo de Peleg.

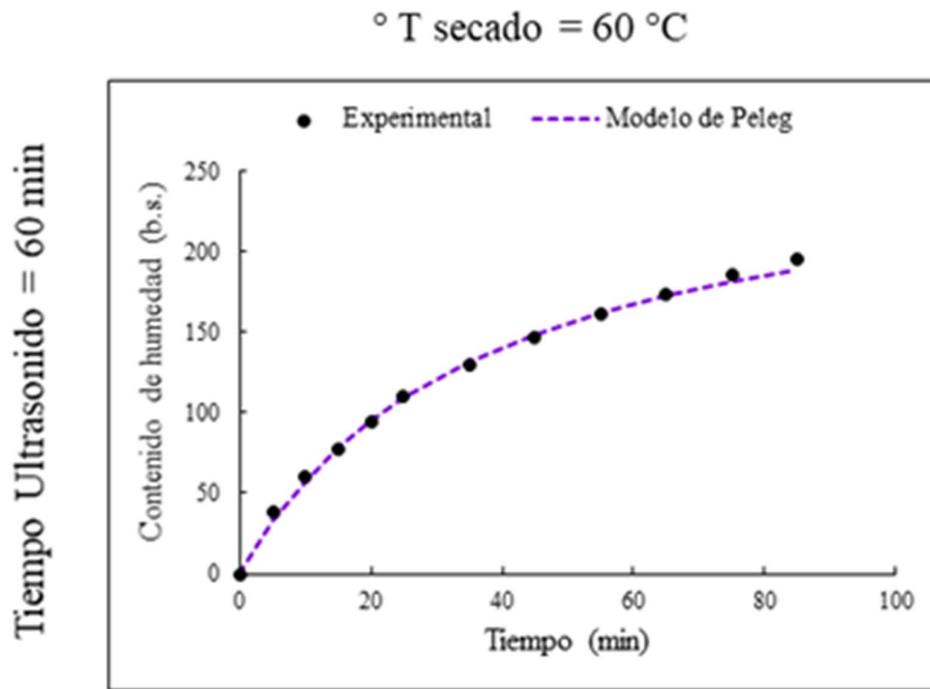


Figura 18. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 60 °C y 60 min de ultrasonido utilizando el modelo de Peleg.

° T secado = 40 °C

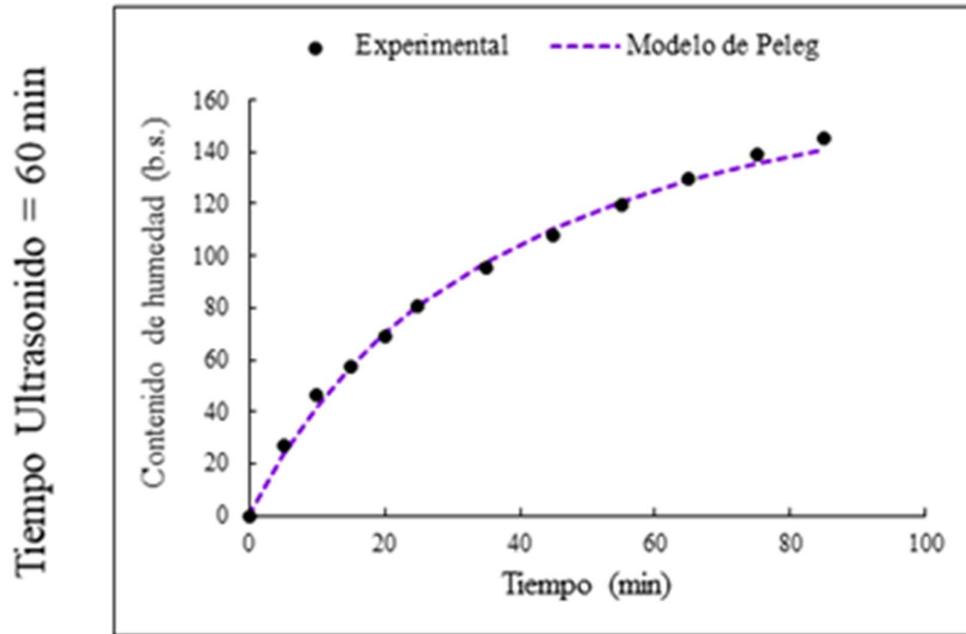


Figura 19. Modelamiento de la rehidratación de rodajas de papa secadas a 40 °C y 60 min de ultrasonido utilizando el modelo de Peleg.

Por el contrario, las muestras secadas a 40 °C retuvieron más agua durante la rehidratación. Este efecto fue más evidente cuando la muestra no fue pre-tratada o pre-tratada con ultrasonido durante 30 min en comparación con las muestras pre-tratadas durante 45 y 60 min. Cuanto más largo sea el tiempo de pretratamiento, mayores serán los daños celulares, alcanzando el mismo daño causado por las muestras secas a alta temperatura (60 ° C).

En conclusión, estos resultados indican que las muestras secas a baja temperatura y el corto tiempo de pretratamiento con ultrasonido presentaron alta capacidad para alcanzar un contenido de máxima humedad debido a que la disrupción celular y los daños en el tejido son menores. Además, los daños estructurales causados por el largo tiempo del proceso de ultrasonido y las altas temperaturas de secado mejoran la tasa de deshidratación; sin embargo, estas muestras no tienen la capacidad de retener el agua absorbida, son inestables. Por lo tanto, es altamente recomendable realizar estudios de optimización para mejorar el proceso de secado-rehidratación combinando los efectos de ultrasonido y temperatura.

4.4. Placket-Burman

Para la optimización del proceso de rehidratación de la papa amarilla en rodajas, se siguió, en primer lugar, un diseño Placket-Burman, para la selección de variables significativas, considerando las variables independientes y dependientes que se muestran en la Tabla 2.

La ganancia de agua (%) en la etapa de rehidratación, como resultado de la interacción de los parámetros de temperatura, tiempo, espesor de la rodaja y el diámetro del mismo. Estos resultados fueron llevados a Statistica para ver su efecto significativo de las variables independientes, la cual se muestra en la Tabla 5.

De esta manera, como se puede identificar en la tabla 6, las variables temperatura de hidratación en ultrasonido y el diámetro de la rodaja de papa resultaron ser significativas ($p < 0.05$). La temperatura es influyente en los procesos de rehidratación porque facilita la difusión del agua hacia la estructura de las muestras de papa (Miano & Augusto, 2018). Mientras que el diámetro de la papa influye en el área de transferencia de masa, por lo que una mayor área favorece una mayor transferencia (Miano & Augusto, 2015).

Tabla 5. Placket-Burman en la ganancia de agua de rehidratación

N	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)	Ganancia de agua en la rehidratación (%)
1	10	30	3	65	19.996
2	40	30	3	45	51.400
3	10	60	3	45	31.329
4	40	60	3	65	30.027
5	10	30	5	65	24.504
6	40	30	5	45	40.634
7	10	60	5	45	23.418
8	40	60	5	65	23.766
9	25	45	4	55	27.896
10	25	45	4	55	27.200

En muchos estudios, las variables independientes para la hidratación, secado y rehidratación fueron principalmente temperatura y tiempo (Šumic, y otros, 2016), (Montanuci, Matos, & Matos, 2015), (Saleh, Akash, & George, 2018), (Kaptso, y otros,

2008). Las dimensiones de las muestras se mantuvieron constantes, sin embargo, para este estudio, sí resultó una variable a considerar en la optimización.

Tabla 6. Análisis de efectos del diseño Placket-Burman para la ganancia porcentual de agua en la rehidratación en rodajas de papa

Variable	Efecto	p
Mean/Interc.	0.300169	0.000003
(1)Temperatura	0.116452	0.009741
(2)Tiempo	-0.069985	0.058707
(3)Espesor	-0.051073	0.135180
(4)Diámetro	-0.121218	0.008289

4.5. Optimización por DCCR

El Diseño Compuesto Central Rotable (DCCR) se realizó con las variables significativas del Placket-Burman. Fijando el espesor de las rodajas a 3mm y manteniendo la hidratación de éstas en la tina de ultrasonido durante un tiempo de 30 minutos.

Tabla 7. Optimización mediante DCCR para la rehidratación porcentual de agua en las rodajas de papa

Diámetro (mm)	Temperatura (°C)	Ganancia de agua en la rehidratación
48	14.4	30.16%
62	14.4	28.64%
48	35.6	25.82%
62	35.6	26.53%
45	25	28.96%
65	25	24.39%
55	10	32.66%
55	40	27.39%
55	25	24.66%
55	25	25.57%

Asimismo, se realizó el análisis estadístico de las variables del DCCR en relación a su ganancia porcentual de agua en la rehidratación (tabla 7 y figura 20). La Tabla 8 reporta que solo la variable temperatura lineal y cuadrática resultó significativa ($p < 0.05$), cuyos niveles óptimos podrían apreciarse en la Figura 20, las temperaturas bajas desde 5 °C hasta 15 °C y en un rango mayor de diámetro de la rodaja superior a los 44 mm pero menor a 54 mm; logran que la ganancia porcentual de agua en la rehidratación sea mayor; en ese sentido los tratamientos 1,2 y obtuvieron una ganancia mayor con 30.16, 28.64 y 32.66% respectivamente.

Tabla 8. Análisis de efectos del DCCR para la ganancia porcentual de agua en la rehidratación en rodajas de papa

Factor	Efecto	P
Mean/Interc.	0.251089	0.000006
(1)Diámetro(L)	-0.018151	0.084362
Diámetro(Q)	0.012730	0.288310
(2)Temperatura(L)	-0.034721	0.012164
Temperatura(Q)	0.046343	0.011860
1L by 2L	0.011166	0.378792

L: Lineal

Q: Cuadrática

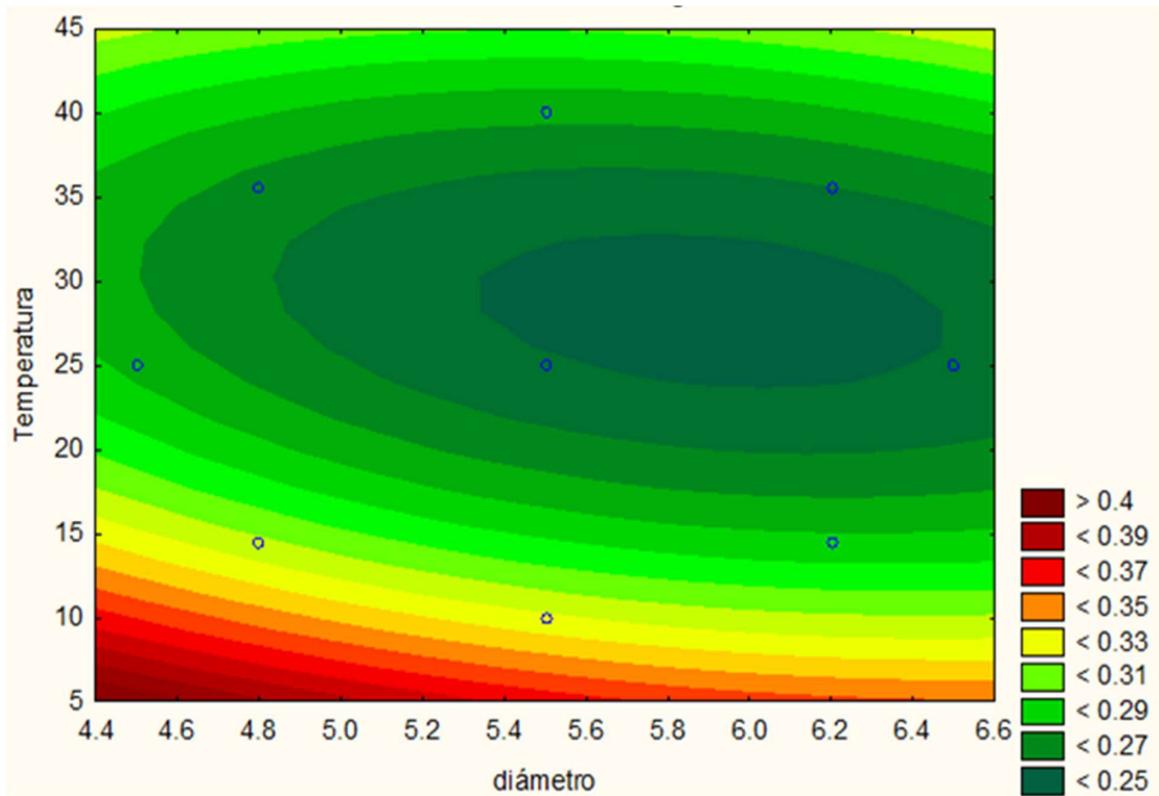


Figura 20. Superficie de Contorno

Las altas temperaturas dañan la membrana de las células lo que provoca una menor capacidad de retención de agua, logrando así que la velocidad de secado y rehidratación sea más rápida, se sature la capa externa y la transferencia de masa en el remojo en agua (Oraian, 2015), lo que provocaría una pérdida de agua mayor que los que se remojan a bajas temperaturas. Además, el pretratamiento con ultrasonido provoca daño en la estructura de las muestras lo que provoca una ganancia rápida de agua durante la rehidratación (Tufekci & Gokhan-Ozkal, 2017), a comparación de muestras controles sin aplicación de ultrasonido. El tiempo de inmersión se mantuvo constante a un bajo tiempo de 30 minutos, pues mientras más prolongado sea el tiempo, la temperatura del líquido y muestra van aumentando, debido al poder de zonificación de la tecnología de ultrasonido (Tufekci & Gokhan-Ozkal, 2017)

Según el estudio de Sumic et al. (2016) el poder de rehidratación de las muestras de pasas de Corinto secas al vacío estuvo entre 17.50% y 41.25%; valores en lo que se encontraron las rodajas de papas rehidratadas, en un rango de 24.39% y 32.66%.

Seremet et al. (2015) reportaron valores de $79.81 \pm 0.3\%$ a 70 °C, $88.97 \pm 0.3\%$ a 60 °C, $92.92 \pm 0.3\%$ a 50 °C, el método combinado 77.68% a 315 W, 85.44% a 210 W, 87.05% a 105 W; en rebanadas de calabaza; valores más altos a los obtenidos en la rehidratación de las rodajas de papa, esta rápida absorción de humedad es muy probable debido a la succión superficial y capilar que tiene las calabazas.

Sin embargo, en contraste a nuestros resultados, el estudio de (Zhang, y otros, 2016) mostró que la rehidratación de pepinos de mar asistido con un alto poder de ultrasonido resultó en una mayor porcentaje y mejoró la capacidad de retención de agua; estos resultados podrían explicarse por el hecho de que la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad tiene el potencial de aumentar las propiedades de unión de agua con el alimento.

5. CONCLUSIONES

- Se determinó que el pre-tratamiento con ultrasonido favorece el proceso de secado y rehidratación de rodajas de papa.
- Se optimizó el proceso utilizando Placket & Burtman para seleccionar variables con efecto significativo y DCCR para encontrar las regiones óptimas en la interacción de las variables significativas.
- Page para secado y Peleg para rehidratación explicaron correctamente ($R^2 > 0.96$) el comportamiento de ambos procesos, respectivamente.
- Se encontró que la aplicación de ultrasonido como pre-tratamiento favorece tanto el proceso de secado como rehidratación, y que el proceso es mayormente dependiente de la temperatura que del tiempo de ultrasonido.
- El análisis de Placket & Burman mostró que la temperatura de ultrasonido y el diámetro de las rodajas de papa tienen efecto significativo en el proceso de rehidratación.
- DCCR mostró que existe una mayor dependencia de la temperatura que del diámetro, sin embargo, la interacción de ambas variables favorece significativamente el proceso de rehidratación.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios sobre el efecto del ultrasonido en otros alimentos con alto contenido de almidón.
- Realizar estudios variando la frecuencia de ultrasonido.
- El Pretratamiento con ultrasonido podría ser una opción para la mejora de procesos en la industria alimentaria.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ceballos-Ortiz, E., & Jiménez-Munguía, M. (2012). Cambios en las propiedades de frutas y verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 98-110.
- Contreras, 2014. Estudio de Parámetros de Calidad de Manzana Deshidratada mediante Secado a baja Temperatura Asistido con ultrasonido. *Universitat Politècnica De València*, 2014.
- Chávez, P. (2008). La papa, Tesoro de los Andes. *Unveristat de les Illes Balears*.
- De la Fuente Blanco S., E. Riera Franco de Sarabia, V.M. Acosta Aparicio, A. Blanco Blanco and J.A. Gallego Juárez. 2006. Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics* 44:e523Pe527.
- Gallego-Juárez J.A. 1998. Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. Pp. 127-143. In M.J.W. Povey, T.J. Mason (Eds). *Ultrasound in Food Processing*. Blackie, Glasgow.
- García-Pérez J.V, J.A. Cárcel, E. Riera and A. Mulet. 2009. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*.27:281-87.
- Gil, Angel, *Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos*, Tomo II 540, 2da Edición - 2010, Editorial Médica Panamericana.
- Henderson, S. M. (1961). Grain Drying Theory (I) Temperature Effect on Drying Coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 169-174.
- Herrero A.M. y Romero de Ávila M.D. 2006. Innovaciones en el procesado de Alimentos: Tecnologías no térmicas *Rev. Med. Univ. Navarra* 50 (4): 71-74.
- Jambrak A.R., T.J. Mason. L. Paniwnyk. And V.Lelas. 2007. Accelerated drying of button mushrooms, brussels sprouts, and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *J. Food Eng.* 81:88-97.

- Kaptso, K., Njintang, Y., Kommeke, A., Hounhouigan, J., Scher, J., & Mbofung, C. (2008). Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds. *Journal of Food Engineering*, 91-99.
- Lewis, W. K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432. doi:10.1021/ie50137a021
- Marín, E., Lemus, R., Flores, V., & Vega, A. (2006). La rehidratación de los alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*.
- Mason T.J., L. Paniwnyk and J.P. Lourimer.1996. The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics Sonochem. Proc.Symp. Chem. Eff. Ultrasound 1995 Int.Chem. Congr. Pac. Basin Soc.*3:S253-S60.
- MINAG. (2011). La papa nuestra de cada día. *Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos*.
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2015). From the sigmoidal to the downward concave shape behavior during the hydration of grains: Effect of the initial moisture content on Adzuki beans (*Vigna angularis*). *Food and Bioproducts Processing*, 96, 43-51. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2015.06.007
- Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2018). The ultrasound assisted hydration as an opportunity to incorporate nutrients into grains. *Food Research International*, 106, 928-935. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.006
- Montanuci, F., Matos, L., & Matos, R. (2015). Effect of time and temperature on the hydration process of barley grains. *Heat Mass Transfer*, 363-372.
- Oraian, M. (2015). The temperature hydration kinetics on *Lens culinaris*. *Journal of Saudi Society of Agricultural Sciences*.
- Ordinola, M. (2011). Innovaciones y desarrollo: El caso de la Cadena de la papa en el Perú. *Revista Latinoamericana de la papa*, 39-57.

- Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers.
- Pumisacho, Manuel. El Cultivo de la Papa en Ecuador 21, 24 y 33, Edición 2002 INIAP - CIP
- Ricce, C., Rojas, M. L., Miano, A. C., Siche, R., & Augusto, P. E. D. (2016). Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. *Food Research International*, 89, 701-708. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.030>
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2018a). Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 65-75. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.08.005>
- Rojas, M. L., & Augusto, P. E. D. (2018b). Microstructure elements affect the mass transfer in foods: The case of convective drying and rehydration of pumpkin. *LWT*, 93, 102-108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.031>
- Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5(4), 1261-1265.
- Rocca, P., & Mascherone, R. (2011). Deshidratación de la papa por métodos combinados de secado: deshidratación osmótica, secado por microondas y convección con aire caliente. *Proyecciones*.
- Saleh, M., Akash, M., & George, O. (2018). Effects of temperature and soaking durations on the hydration kinetics of hybrid and pureline parboiled brown rice cultivars. *Journal of Food Measurement and Characterization*.
- Seremet, L., Botez, E., Nistor, O.-V., Andronoiu, D., & Mocanu, G.-D. (2015). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of Pumpkin slices. *Food Chemistry*.

- Šumic, Z., Vakula, A., Tepic, A., Cakarevic, J., Vitas, J., & Pavlic, B. (2016). Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM). *Food Chemistry*, 465-475.
- Tufekci, S., & Gokhan-Ozkal, S. (2017). Enhancement of drying and rehydration characteristics of okra by ultrasound pre treatment application. *Heat Mass Transfer*, 2279-2286.
- Zhang, L., Huang, X., Miao, S., Zeng, S., Zhang, Y., & Zheng, B. (2016). Influence of ultrasound on the rehydration of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *Journal of Food Engineering*.

ANEXOS

Tabla 9. Peso de Muestras Control secadas a 60 °C (3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	60°C			
5	25.8209	28.3414	26.4658	26.8760
10	24.8855	27.3119	27.4908	26.5627
15	24.8891	26.3669	26.7253	25.9938
20	23.5765	24.3774	25.8637	24.6059
30	22.6755	22.6777	24.1924	23.1819
40	21.5525	21.1104	22.7644	21.8091
60	18.9172	18.3065	19.8877	19.0371
80	17.1741	15.8921	17.6168	16.8943
100	15.1126	13.7381	15.3976	14.7494
120	13.8428	11.9510	13.6275	13.1404
140	12.0124	10.2120	12.9913	11.7386
160	9.9099	9.3154	11.5809	10.2687
180	8.9663	8.2512	10.3567	9.1914
200	8.1361	8.182	9.1038	8.4740
220	7.505	7.5018	8.2838	7.7635
240	7.1721	7.0551	7.629	7.2854

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10. Peso de Muestras Control secadas a 40 °C (3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	40°C			
5	29.2795	28.7112	29.9538	29.3148
10	28.7094	28.2867	29.5545	28.8502
15	28.2804	27.8513	29.303	28.4782
20	27.9483	27.3977	28.9003	28.0821
30	26.9988	26.6783	28.2308	27.3026
40	26.136	25.8977	27.5231	26.5189
60	24.5336	24.4028	26.2545	25.0636
80	23.057	23.2447	25.0693	23.7903
100	21.5186	22.1251	24.0357	22.5598
120	20.3166	20.8806	23.0922	21.4298
140	19.2994	19.7873	22.0985	20.3951
160	18.3283	18.8591	21.1528	19.4467
180	17.1665	17.8298	20.2433	18.4132
200	15.9876	16.8473	19.4376	17.4242
220	15.1026	15.9533	18.6389	16.5649
240	14.1038	15.034	17.8315	15.6564

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11. Peso de Muestras pre tratadas a 30 min con ultrasonido secadas a 60 °C

(3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	60°C			
0	26.131	25.602	28.256	26.663
5	24.802	25.006	27.490	25.766
10	23.539	23.934	26.882	24.785
15	22.462	23.277	26.075	23.938
20	21.143	22.555	25.391	23.030
30	19.099	21.489	24.115	21.568
40	17.081	20.524	22.812	20.139
60	13.965	18.378	19.445	17.263
80	11.545	16.501	17.410	15.152
100	9.459	14.662	15.068	13.063
120	7.774	12.684	13.076	11.178
140	7.001	10.610	11.096	9.569
160	6.608	9.535	9.617	8.587
180	6.493	7.607	8.042	7.381
200	6.407	6.868	7.048	6.775
220	6.354	6.508	6.560	6.474
240	6.325	6.385	6.413	6.374

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12. Peso de Muestras pre tratadas a 30 min con ultrasonido secadas a 40 °C

(3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	40°C			
0	25.825	26.482	30.366	27.558
5	25.349	26.241	29.956	27.182
10	25.015	25.950	29.627	26.864
15	24.682	25.696	29.377	26.585
20	24.314	25.443	29.179	26.312
30	23.514	25.012	28.794	25.773
40	22.763	24.535	28.439	25.245
60	21.264	23.832	27.752	24.283
80	20.043	23.056	27.069	23.389
100	18.569	22.378	26.359	22.435
120	17.283	21.479	25.671	21.478
140	15.984	19.586	24.446	20.005
160	14.460	18.591	23.196	18.749
180	13.635	16.546	22.170	17.450
200	12.639	15.659	21.007	16.435
220	11.484	14.871	19.935	15.430
240	10.739	14.207	18.804	14.583

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13. Peso de Muestras pre tratadas a 45 min con ultrasonido secadas a 60 °C

(3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	60°C			
0	32.834	30.864	29.714	31.137
5	32.289	30.162	29.243	30.564
10	31.419	29.338	28.691	29.816
15	30.665	28.640	27.998	29.101
20	29.907	28.187	27.326	28.473
30	28.510	26.882	26.701	27.365
40	27.137	25.242	25.362	25.914
60	24.457	22.526	22.773	23.252
80	21.915	19.510	20.473	20.633
100	19.659	17.102	18.173	18.311
120	17.469	14.813	16.084	16.122
140	15.338	12.849	14.163	14.117
160	12.946	11.190	12.622	12.253
180	11.293	9.836	10.897	10.675
200	10.026	8.733	9.678	9.479
220	9.029	7.992	8.434	8.485
240	8.325	7.636	7.589	7.850

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 14. Peso de Muestras pre tratadas a 45 min con ultrasonido secadas a 40 °C

(3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	40°C			
0	30.204	27.096	29.746	29.015
5	29.747	26.654	29.350	28.584
10	29.264	26.233	28.846	28.114
15	29.017	25.749	28.367	27.711
20	28.752	25.404	27.961	27.372
30	28.281	24.419	27.127	26.609
40	27.849	23.963	26.332	26.048
60	26.905	22.260	25.049	24.738
80	25.940	20.593	24.300	23.611
100	25.078	19.184	23.345	22.536
120	24.452	17.643	22.177	21.424
140	23.741	16.362	20.533	20.212
160	23.121	15.057	19.155	19.111
180	22.617	13.967	17.598	18.061
200	21.726	12.928	16.411	17.022
220	21.058	11.861	15.256	16.058
240	20.334	11.024	14.197	15.185

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 15. Peso de Muestras pre tratadas a 60 min con ultrasonido secadas a 60 °C

(3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	60°C			
0	33.226	31.915	30.126	31.756
5	31.926	31.349	29.537	30.937
10	30.795	30.629	28.894	30.106
15	29.774	30.022	28.254	29.350
20	28.569	29.380	27.550	28.499
30	26.940	28.047	26.288	27.092
40	25.006	26.868	25.244	25.706
60	21.750	24.742	22.933	23.142
80	18.720	22.895	20.907	20.841
100	16.065	21.104	19.269	18.812
120	13.791	19.391	17.463	16.881
140	11.881	17.699	15.851	15.144
160	10.162	15.999	14.196	13.453
180	8.881	14.508	12.934	12.107
200	8.059	13.057	11.606	10.907
220	7.549	11.679	10.319	9.849
240	7.348	10.370	9.404	9.040

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16. Peso de Muestras pre tratadas a 60 min con ultrasonido secadas a 40 °C

(3 repeticiones)

SECADO	R1	R2	R3	PROMEDIO
	40°C			
0	32.056	28.494	28.303	29.617
5	31.403	28.070	27.881	29.118
10	30.991	27.599	27.313	28.634
15	30.586	27.198	26.715	28.166
20	30.127	26.809	26.126	27.687
30	29.126	26.094	25.293	26.837
40	28.250	25.329	24.302	25.960
60	26.559	24.196	22.337	24.364
80	25.429	22.967	20.639	23.012
100	24.068	22.156	19.067	21.764
120	22.390	21.312	17.615	20.439
140	20.636	20.523	16.099	19.086
160	18.988	19.594	14.809	17.797
180	17.898	18.776	13.693	16.789
200	16.726	17.854	12.588	15.723
220	15.820	16.808	11.664	14.764
240	14.946	15.835	10.857	13.879

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 17. Ganancia de Agua de Muestras pre tratadas a 0, 30, 45 y 60 min. con ultrasonido, secadas a 60 °C

Tiempo	60°C			
	0 min	30 min	45 min	60 min
0	0.15282366	0.23115952	0.24365152	0.04639611
5	29.1086789	34.3263899	33.2750314	32.4180054
10	52.041134	60.1261733	59.1395554	57.8836769
15	70.6526034	80.3296123	79.9414468	78.4403068
20	86.0591925	96.5794329	97.0346142	95.3825865
25	99.0230935	109.932731	111.329709	109.586722
35	119.628535	130.578933	133.887287	132.066313
45	135.273129	145.799145	150.881211	149.054708
55	147.555907	157.48393	164.143859	162.344951
65	157.455353	166.736947	174.782555	173.026068
75	165.603804	174.245776	183.505906	181.797711
85	172.428081	180.461106	190.788441	189.129906

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Ganancia de Agua de Muestras pre tratadas a 0, 30, 45 y 60 min. con ultrasonido, secadas a 40 °C

Tiempo	40°C			
	0 min	30 min	45 min	60 min
0	0.3209551	0.20995997	0.09466259	0.06595207
5	29.5508287	31.6477209	30.5229569	23.59158
10	52.2671316	56.259197	54.1234645	42.2848343
15	70.428819	76.0499961	72.9624823	57.4959579
20	85.2808802	92.3101276	88.3489417	70.1150147
25	97.6524446	105.907021	101.15228	80.7525408
35	117.084016	127.360005	121.237531	97.6965514
45	131.650113	143.519485	136.27404	110.59101
55	142.97481	156.129536	147.952889	120.732694
65	152.03174	166.243881	157.285772	128.918099
75	159.440088	174.536708	164.915036	135.663468
85	165.612428	181.459431	171.268134	141.31809

Fuente: Elaboración Propia



Figura 21. Papa Amarilla-Control Tratamiento 0' temperatura: 40°C

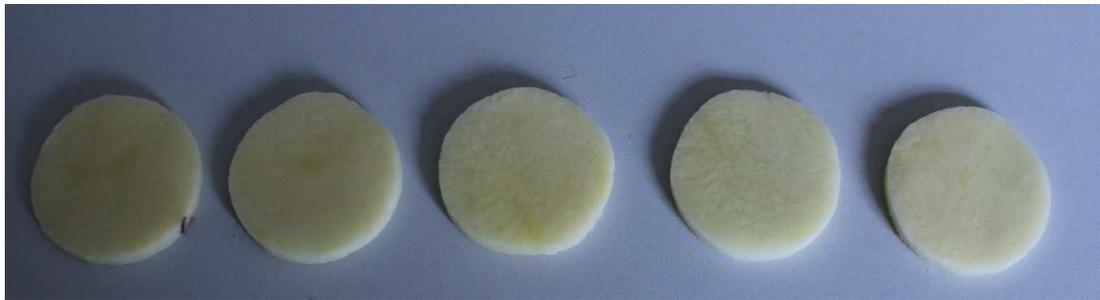


Figura 22. Papa Amarilla Tratamiento 0' U.S: 30' temperatura: 40°C



Figura 23. Papa Amarilla Control Tratamiento 5' Temperatura: 40°C



Figura 24. Papa Amarilla Tratamiento 5' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 25. Papa Amarilla Control Tratamiento 10' Temperatura: 40°C



Figura 26. Papa Amarilla Tratamiento 10' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 27. Papa Amarilla Control Tratamiento 15' Temperatura: 40°C



Figura 28. Papa Amarilla Tratamiento 15' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 29. Papa Amarilla Control Tratamiento 20' Temperatura: 40°C



Figura 30. Papa Amarilla Tratamiento 20' U.S: 30' Temperatura: 40°C

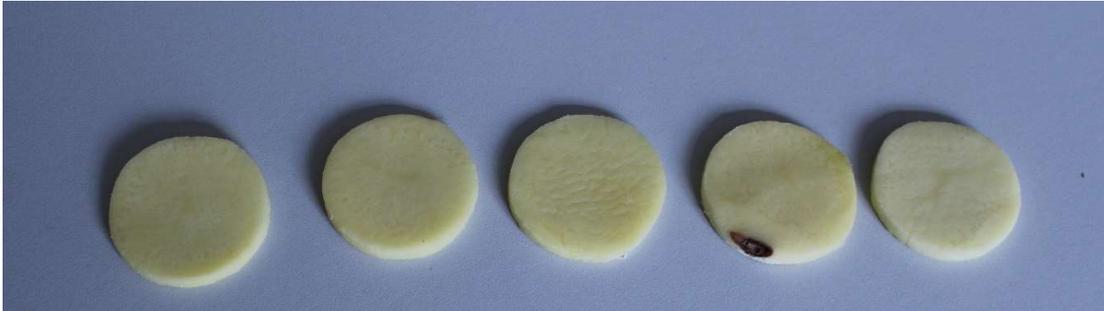


Figura 31. Papa Amarilla Control Tratamiento 30' Temperatura: 40°C



Figura 32. Papa Amarilla Tratamiento 30' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 33. Papa Amarilla Control Tratamiento 40' Temperatura: 40°C



Figura 34. Papa Amarilla Tratamiento 40' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 35. Papa Amarilla Control Tratamiento 60' Temperatura: 40°C



Figura 36. Papa Amarilla Tratamiento 60' U.S: 30' Temperatura: 40°C

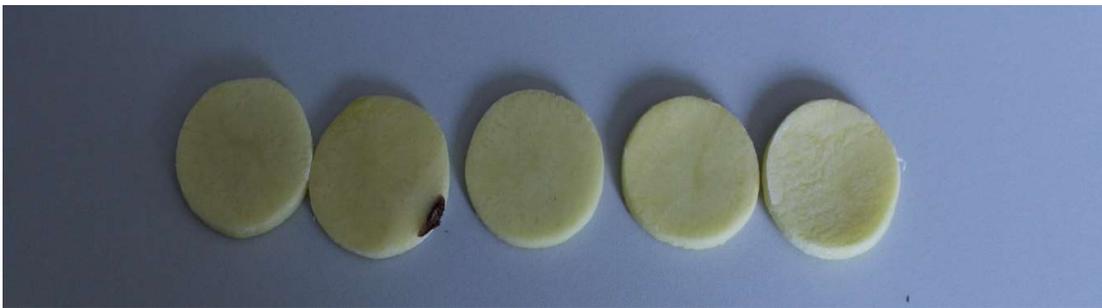


Figura 37. Papa Amarilla Control Tratamiento 80' Temperatura: 40°C



Figura 38. Papa Amarilla Tratamiento 80' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 39. Papa Amarilla Control Tratamiento 100' Temperatura: 40°C



Figura 40. Papa Amarilla Tratamiento 100' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 41. Papa Amarilla Control Tratamiento 120' Temperatura: 40°C



Figura 42. Papa Amarilla Tratamiento 120' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 43. Papa Amarilla Control Tratamiento 140' Temperatura: 40°C



Figura 44. Papa Amarilla Tratamiento 140' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 45. Papa Amarilla Control Tratamiento 160' Temperatura: 40°C



Figura 46. Papa Amarilla Tratamiento 160' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 47. Papa Amarilla Control Tratamiento 180' Temperatura: 40°C



Figura 48. Papa Amarilla Tratamiento 180' U.S: 30' Temperatura: 40°C

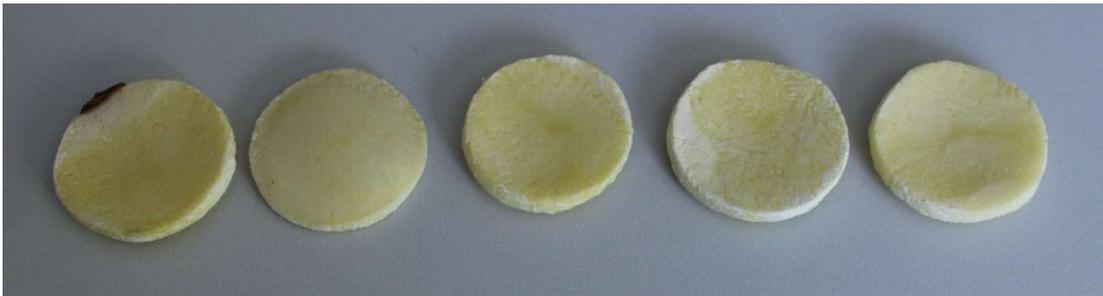


Figura 49. Papa Amarilla Control Tratamiento 200' Temperatura: 40°C



Figura 50. Papa Amarilla Tratamiento 200' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 51. Papa Amarilla Control Tratamiento 220' Temperatura: 40°C



Figura 52. Papa Amarilla Tratamiento 220' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 53. Papa Amarilla Control Tratamiento 240' Temperatura: 40°C



Figura 54. Papa Amarilla Tratamiento 240' U.S: 30' Temperatura: 40°C



Figura 55. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 0' 40°C



Figura 56. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 5' 40°C



Figura 57. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 10' 40°C



Figura 58. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 15' 40°C



Figura 59. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 20' 40°C



Figura 60. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 25' 40°C



Figura 61. Rehidratación Papa Amarilla US 30' secado 0' 40°C



Figura 62. Rehidratación Papa Amarilla control-secado 35' 40°C



Figura 63. Rehidratación Papa Amarilla US 30' secado 5' 40°C

8	pericles.pericles-prod.literatumonline.com Fuente de Internet	<1 %
9	Dilara Çağlayan, Işıl Barutçu Mazi. "Effects of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment and finish drying methods on the quality of pumpkin slices", Journal of Food Processing and Preservation, 2018 Publicación	<1 %
10	teses.usp.br Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.unas.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to Monash University Trabajo del estudiante	<1 %
14	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1 %
15	www.scielo.cl Fuente de Internet	<1 %
16	Ricce, Cinthia, Meliza Lindsay Rojas, Alberto Claudio Miano, Raul Siche, and Pedro Esteves Duarte Augusto. "Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration", Food Research International, 2016.	<1 %

17 s3.accesoperu.com <1 %
Fuente de Internet

18 Grant Thamkaew, Ingegerd Sjöholm, Federico Gómez Galindo. "A review of drying methods for improving the quality of dried herbs", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020
Publicación

19 www.scribd.com <1 %
Fuente de Internet

20 www.mysciencework.com <1 %
Fuente de Internet

21 eprints.nottingham.ac.uk <1 %
Fuente de Internet

22 Munawar Khalil, Badrul Mohamed Jan. "Viscoplastic Modeling of a Novel Lightweight Biopolymer Drilling Fluid for Underbalanced Drilling", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012
Publicación

23 guaiaca.ufpel.edu.br:8080 <1 %
Fuente de Internet

24 jame.um.ac.ir <1 %
Fuente de Internet

25 Mohammad Kaveh, Ebrahim Taghinezhad,

Muhammad Aziz. " Effects of physical and chemical pretreatments on drying and quality properties of blackberry (spp.) in hot air dryer ", Food Science & Nutrition, 2020

Publicación

<1 %

26

Erkan Dikmen, Mahir Ayaz, Tuğba Kovacı, Arzu Şencan Şahin. "Mathematical modelling of drying characteristics of medical plants in a vacuum heat pump dryer", International Journal of Ambient Energy, 2018

Publicación

<1 %

27

Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA

Trabajo del estudiante

<1 %

28

theses.gla.ac.uk

Fuente de Internet

<1 %

29

revistas.udca.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

30

repositorio.lamolina.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

31

Seremet (Ceclu), Liliana, Elisabeta Botez, Oana-Viorela Nistor, Doina Georgeta Andronoiu, and Gabriel-Danut Mocanu. "Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices", Food Chemistry, 2016.

Publicación

<1 %

32	business.visa.com Fuente de Internet	<1 %
33	link.springer.com Fuente de Internet	<1 %
34	www.myfoodresearch.com Fuente de Internet	<1 %
35	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	Submitted to Universidad Nacional de Colombia Trabajo del estudiante	<1 %
38	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
39	repositorio.unajma.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	repositorio.educacionsuperior.gob.ec Fuente de Internet	<1 %
41	kb.psu.ac.th Fuente de Internet	<1 %
42	onlinelibrary.wiley.com Fuente de Internet	<1 %
43	Samouel O. Oladele, Leo A. S. Agbetoye,	

Oluwatooyin F. Osundahunsi, Pedro E. D. Augusto. "Oat hydration kinetics at different temperatures: Evaluation, model, and validation", Journal of Food Process Engineering, 2019

Publicación

<1 %

44

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

45

Andreia Carneiro-Carvalho, Alice Vilela, Jorge Ferreira-Cardoso, Tiago Marques et al. "Productivity, chemical composition and sensory quality of "Martaínha" chestnut variety treated with Silicon", CyTA - Journal of Food, 2019

Publicación

<1 %

46

Submitted to Unviersidad de Granada

Trabajo del estudiante

<1 %

47

Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru

Trabajo del estudiante

<1 %

48

www.google.it

Fuente de Internet

<1 %

49

Ronicely P. da Rocha, Evandro de C. Melo, José B. Corbín, Pedro A. Berbert, Sérgio M. L. Donzeles, Jon A. Tabar. "Cinética del secado de tomillo", Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2012

Publicación

<1 %

50	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1 %
51	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
52	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
53	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
54	pa.bibdigital.uccor.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
55	repositorio.unj.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
56	L. M. Carrillo-Lopez, A. D. Alarcon-Rojo, L. Luna-Rodriguez, R. Reyes-Villagrana. "Modification of Food Systems by Ultrasound", Journal of Food Quality, 2017 Publicación	<1 %
57	J. Osorio-Arias, S. Delgado-Arias, L. Cano, S. Zapata, M. Quintero, H. Nuñez, C. Ramírez, R. Simpson, O. Vega-Castro. "Sustainable Management and Valorization of Spent Coffee Grounds Through the Optimization of Thin Layer Hot Air-Drying Process", Waste and Biomass Valorization, 2019 Publicación	<1 %

58	Jambrak, A.R.. "Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties", Journal of Food Engineering, 200707 Publicación	<1 %
59	www.tdx.cat Fuente de Internet	<1 %
60	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
61	www.med2europe.eu Fuente de Internet	<1 %
62	www.saludymedicina.com.mx Fuente de Internet	<1 %
63	pesquisa.bvsalud.org Fuente de Internet	<1 %
64	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
65	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
66	Yao, Y.. "Using power ultrasound for the regeneration of dehumidizers in desiccant air-conditioning systems: A review of prospective studies and unexplored issues", Renewable and	<1 %

67 Meliza Lindsay Rojas Silva. "Emerging technologies to improve food drying: ultrasound and ethanol on convective and infrared drying", Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2020 <1%
Publicación

68 Submitted to Universitat Politècnica de València <1%
Trabajo del estudiante

69 dehesa.unex.es <1%
Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado