

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS**



***ESTUDIO DEL SECADO DE PHYSALIS PERUVIANA LINNAEUS  
POR VENTANA DE REFRACTANCIA Y COMPARACIÓN CON  
SECADO CONVECTIVO Y CONVECTIVO ASISTIDO CON  
RADIACIÓN INFRARROJA***

**Tesis presentada a la Universidad de Chile para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de los Alimentos y Memoria para optar al  
Título Profesional de Ingeniera en Alimentos por:**

***Yasna Andrea Soto Núñez***

**Director de Tesis: Dr. Luis Puente Díaz  
Co-Director de Tesis: Dr. Roberto Mondaca**

**Santiago-CHILE**

**Abril 2022**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS**

**INFORME DE APROBACIÓN DE TESIS DE DOCTORADO**

Se informa a la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas que la Tesis de Magíster presentada por el candidato

***Yasna Andrea Soto Núñez***

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluadora de Tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Ciencias de los Alimentos

Director de Tesis: Dr. Luis Puente Díaz \_\_\_\_\_

Co-director de Tesis: Dr. Roberto Lemus Mondaca \_\_\_\_\_

Comisión Evaluadora de Tesis:

Presidente Dr. Jaime Ortiz \_\_\_\_\_

Dr. Carlos Basualto \_\_\_\_\_

Dr. José Miguel Bastía \_\_\_\_\_

## DEDICATORIA

*A mis padres*

## **AGRADECIMIENTOS**

En el presente quiero expresar mis agradecimientos al proyecto fondecyt 1171485 por financiar esta investigación. Le agradezco a la Universidad de Chile por ser la institución que me permitió estudiar, a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas y a sus docentes por el conocimiento brindado, al Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química y sus técnicos por el apoyo.

Expreso mis agradecimientos al profesor Luis Puente por su patrocinio, confianza y paciencia, le agradezco su disposición a ayudar, enseñar, guiarme en este proceso y el tiempo invertido, muchas gracias.

Le agradezco a mis padres, por todo.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE.....	V
ÍNDICES DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. Physalis Peruviana L.....	2
3. Proceso de Secado.....	3
3.1. Secado convectivo por aire caliente (HAD, Hot Air Drying).....	3
3.2. Secado convectivo asistido con luz infrarroja (Hot Air Drying – InfraRed) .....	5
3.3. Secado por Ventana de Refractancia (RW, Refractance Window <sup>TM</sup> ).....	8
3.3.1 Mylar ® .....	12
4. Transferencia de calor y masa durante el proceso de secado.....	13
5. Curvas de secado .....	15
5.1. Razón de Humedad MR .....	17
5.2. Estimación de la difusión efectiva de humedad ( $D_{eff}$ ).....	17
5.3. Energía de activación ( $E_a$ ) y $D_o$ .....	19
6. Modelamiento matemático del proceso de secado .....	20
6.1 El modelo de Newton .....	20
6.2 El modelo de Henderson y Pabis.....	20
6.3 El modelo de Page.....	20
6.4 El modelo de Page modificado.....	21
6.5 El modelo de Weibull .....	21
6.6 análisis de los modelos matemáticos .....	21
6.6.1 Valor Chi-Cuadrado ( $X^2$ ).....	22
6.6.2 Suma de cuadrados del error residuales (SSE).....	22
7. Eficiencia de secado (DE) y Eficiencia energética ( $\eta_e$ ).....	23
8. Color.....	25
8.1 Cambio de color ( $\Delta E$ ).....	26

8.2 Valor Chroma (C*).....	27
8.3. Ángulo Hue (H°) .....	28
8.4. Índice de Pardeamiento (BI).....	29
9. Calidad final de productos deshidratados.....	30
10. HIPOTESIS DEL TRABAJO.....	32
11. OBJETIVOS .....	33
11.1. Objetivo general.....	33
11.2. Objetivos específicos .....	33
12. MATERIALES Y MÉTODOS (MATERIAS PRIMAS, REACTIVOS, EQUIPOS).....	34
12.1 Materia Prima.....	34
12.2. Preparación de las muestras.....	34
12.3 Procesos de secado.....	35
12.3.1. Secador convectivo por aire caliente.....	38
12.3.2. Secador convectivo asistido con luz infrarroja .....	39
12.3.3 Secador por Ventana de Refractancia a escala de laboratorio .....	40
12.3.4. Secador por Ventana de Refractancia de escala industrial .....	41
12.4. Humedad.....	42
12.4.1. Humedad inicial .....	42
12.4.2 Humedad de las muestras tratadas en el equipo de Ventana de Refractancia de escala industrial .....	43
12.5. Curva de secado .....	43
12.6. Modelamiento matemático de la curva de secado .....	43
12.7 Eficiencia de secado y eficiencia energética.....	44
12.8. Medición de color .....	45
12.9. Imagen térmica.....	45
12.10. Análisis estadístico.....	46
13. RESULTADO Y DISCUSIÓN .....	46
13.1. Cinética de secado .....	47
13.2. Difusividad ( $D_{eff}$ ).....	51
13.3 Energía de activación .....	54
13.4 Modelamiento matemático .....	57
13.4.1 Parámetros estadísticos de modelos matemáticos .....	58
13.4.2 Tiempo de secado calculado por modelo matemático .....	62

<b>13.5. Eficiencia de secado</b> .....	64
<b>13.6. Color</b> .....	67
<b>13.6.1 Color inicial de las muestras</b> .....	67
<b>13.6.2. Color superficial</b> .....	68
<b>13.6.3. Cambio de color (<math>\Delta E</math>)</b> .....	70
<b>13.6.4 Valor Croma (<math>C^*</math>)</b> .....	71
<b>13.6.5 Ángulo Hue (<math>H^\circ</math>)</b> .....	72
<b>13.6.6 Índice de Pardeamiento (BI)</b> .....	73
<b>13.6.7 Evolución del color durante el proceso de secado por Ventana de Refractancia</b> .....	75
<b>13.6.8 Cambio de color (<math>\Delta E</math>)</b> .....	77
<b>13.6.9 Valor Croma (<math>C^*</math>)</b> .....	78
<b>13.6.8. Ángulo Hue (<math>H^\circ</math>)</b> .....	78
<b>13.8. Imágenes térmicas</b> .....	81
<b>13.8. Condiciones de secado del método de Ventana de Refractancia</b> .....	85
<b>14. CONCLUSIÓN</b> .....	86
<b>15. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	88

## ÍNDICES DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN DE TRATAMIENTOS DE SECADO APLICADOS A PURÉ DE PHYSALIS CON LOS TIPOS DE SECADO, TEMPERATURA DE SECADO, INTENSIDAD DE LUZ IR APLICADA Y LA NOMENCLATURA UTILIZADA PARA IDENTIFICAR CADA TRATAMIENTO DE SECADO	37
TABLA 2: RESUMEN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS EN EL SECADO DE MUESTRAS DE PURÉ DE PHYSALIS. ....	44
TABLA 3: VALORES DE DIFUSIVIDAD ( $M^2/S$ ) $\times 10^{-8}$ DE SECADO DE PURÉ DE PHYSALIS CON DIFERENTES MÉTODOS DE SECADO Y TEMPERATURAS. LETRAS MINÚSCULAS DENOTAN GRUPOS HOMOGÉNEOS DE ACUERDO CON EL MÉTODO DE SECADO. ....	51
TABLA 4: ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (KJ/MOL) Y $D_0$ ( $M^2/S$ ) DE LOS MÉTODOS DE SECADO..	55
TABLA 5: PARÁMETROS EMPÍRICOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS EN LA SIMULACIÓN DE LA CURVA DE SECADO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE SECADO PARA EL PURÉ DE PHYSALIS.....	57
TABLA 6: RESULTADO DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	59
TABLA 7: TIEMPO PREDICHO DE SECADO PARA OBTENER MR DE 0,002 CON LA ECUACIÓN DE WEIBULL DE CADA MÉTODO DE SECADO. ....	62
TABLA 8: VALORES CALCULADOS DE LA EFICIENCIA DE SECADO (DE), EFICIENCIA ENERGÉTICA ( $H_E$ ), ENERGÍA PARA LA EVAPORACIÓN DE HUMEDAD ( $Q_w$ ) ENERGÍA PARA CALENTAR EL MATERIAL ( $Q_M$ ), CONSUMO DE ENERGÍA MECÁNICA ( $EU_{MEC}$ ) Y CONSUMO DE ENERGÍA TÉRMICA ( $EU_{TER}$ ) PARA EL SECADO DE PURÉ DE PHYSALIS POR TODOS LOS TRATAMIENTOS DE SECADO REALIZADOS .....	64
TABLA 9: RESULTADO DE LOS PARÁMETROS $\Delta E$ , $C^*$ , $\Delta C^*$ , $H^\circ$ Y $\Delta H^\circ$ DEL COLOR SUPERFICIAL DE LAS MUESTRAS SECADAS POR LOS DISTINTOS TIPOS DE SECADOS .	68
TABLA 10: COLOR DE MUESTRAS TRATADAS CON VENTANA DE REFRACTANCIA EN EL TIEMPO.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: TRANSFERENCIA DE CALOR DESDE EL AIRE CALIENTE A LA MUESTRA HÚMEDA EN UN SECADOR CONVECTIVO DE AIRE CALIENTE .....	5
FIGURA 2: TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN SECADOR DE AIRE CALIENTE ASISTIDO CON RADIACIÓN INFRARROJA. ....	8
FIGURA 3: TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA..	9
FIGURA 4: PROCESO DE “VENTANA” DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN RW. ....	10
FIGURA 5: CURVA DE SECADO TÍPICA DE LA VARIACIÓN DE LA HUMEDAD EN EL TIEMPO Y LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL SECADO, MUESTRA LAS FASES DE SECADO, VELOCIDAD CONTANTE Y DECRECIENTE DE SECADO, HUMEDAD CRÍTICA Y HUMEDAD DE EQUILIBRIO. ....	17
FIGURA 6: REPRESENTACIÓN DE LA DESCRIPCIÓN TRIDIMENSIONAL DE LAS COORDENADAS CIE LAB .....	26
FIGURA 7: REPRESENTACIÓN DE LA DIFERENCIA DE COLOR EN AL PLANO DE COORDENADAS DE COLOR .....	27
FIGURA 8: REPRESENTACIÓN BIDIMENSIONAL DEL ÁNGULO HUE, INDICANDO LOS COLORES BÁSICOS Y SU ÁNGULO .....	29
FIGURA 9: IMAGEN DE UN FRUTO DE PHYSALIS CON SU CALIX .....	34
FIGURA 10: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS .....	35
FIGURA 11: DIAGRAMA DE LOS PROCESOS DE SECADO DE LAS MUESTRAS DE PHYSALIS	37
FIGURA 12: ILUSTRACIÓN DEL EQUIPO DE SECADO DE AIRE CONVECTIVO Y SECADO DE AIRE CONVECTIVO ASISTIDO CON LUZ INFRARROJA.....	38
FIGURA 13: ESQUEMA DEL INTERIOR DEL SECADOR DE AIRE CONVECTIVO, EN DONDE 1 CORRESPONDE AL VENTILADOR, 2 ES EL BANCO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS, 3 ES EL SITIO PARA COLOCAR LAS MUESTRAS A SECAR Y 4 ES LA MUESTRA. ....	39
FIGURA 14: DISEÑO DE SECADOR DE AIRE CONVECTIVO ASISTIDO CON LUZ IR, EN DONDE 1 CORRESPONDE AL VENTILADOR, 2 ES EL BANCO DE RESISTENCIAS ELÉCTRICAS, 3 ES EL SITIO PARA COLOCAR LAS MUESTRAS A SECAR Y 4 ES LA LÁMPARA QUE EMITE RADIACIÓN INFRARROJA. ....	39
FIGURA 15: BANDEJA METÁLICA CON PURÉ DE PHYSALIS DESCONGELADO .....	40

FIGURA 16: ESQUEMA DE LA FORMACIÓN DE LAS BANDEJAS DE FILM MYLAR® PARA REALIZAR EL SECADO DE VENTANA DE REFRACTANCIA A ESCALA DE LABORATORIO (LRW) .....	40
FIGURA 17: REPRESENTACIÓN DEL EQUIPO DE VENTANA DE REFRACTANCIA A ESCALA DE LABORATORIO .....	41
FIGURA 18: ESQUEMA DEL SECADOR DE VENTANA DE REFRACTANCIA DE ESCALA INDUSTRIAL.....	42
FIGURA 19: IMAGEN DE LA BANDA DE MYLAR® CON PURÉ DE PHYSALIS DEL EQUIPO DE VENTANA DE REFRACTANCIA DE ESCALA INDUSTRIAL .....	42
FIGURA 20: MÉTODO DE LA TOMA DE IMÁGENES TÉRMICAS, (A) VISTA FRONTAL Y (B) VISTA SUPERIOR.....	45
FIGURA 21: IMAGEN DEL EQUIPO DE VENTANA DE REFRACTANCIA A ESCALA DE LABORATORIO CON LA CÁMARA INFRARROJA INSTALADA .....	46
FIGURA 22: CURVA DE SECADO DE LOS PROCESOS DE SECADO REALIZADOS EN LAS MUESTRAS DE PURÉ DE PHYSALIS .....	47
FIGURA 23: CURVAS DE SECADO DE LOS PROCESOS CON TEMPERATURA DE 50°C .....	47
FIGURA 24: CURVAS DE SECADO DE LOS PROCESOS CON TEMPERATURA DE 60°C .....	48
FIGURA 25: CURVAS DE SECADO DE LOS PROCESOS CON TEMPERATURA DE 70°C .....	48
FIGURA 26: GRÁFICOS ENTRE $MR_{EXPERIMENTAL}$ VS $MR_{PREDICHO}$ PARA TODOS LOS TRATAMIENTOS DE SECADO, EN DONDE LA CURVA CON LÍNEA DE COLOR NEGRO CORRESPONDE A LOS VALORES DE $MR_{PREDICHO}$ CALCULADOS CON LA ECUACIÓN DEL MODELO DE WEIBULL DE CADA SECADO Y LA LÍNEA ROJA CORRESPONDE A UNA CURVA RECTA CON PENDIENTE DE 45° CON LA QUE SE PUEDE COMPARAR EL AJUSTE DEL MODELO. ....	61
FIGURA 27: TIEMPO PREDICHO DE SECADO EN MINUTOS CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE WEIBULL OBTENIDA DE CADA MÉTODO DE SECADO, LAS LÍNEAS ROJAS INDICAN EL TIEMPO MÍNIMO Y EL TIEMPO MÁXIMO PREDICHOS.....	63
FIGURA 28: EFICIENCIA DE SECADO (%) DE CADA PROCESO DE SECADO, LAS LETRAS MINÚSCULAS (A-J) INDICAN LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS RESULTADO DE LA ANOVA DE UNA VÍA.....	66

FIGURA 29: COLOR INICIAL DEL PURÉ DE PHYSALIS REPRESENTADO EN LA RUEDA DE COLOR, IMAGEN DEL COLOR OBTENIDA DESDE LA RUEDA, VALORES LAB REPRESENTADOS EN SUS EJES CORRESPONDIENTES E IMAGEN DE MUESTRA INICIAL (FUENTE: ADOBE COLOR) .....	67
FIGURA 30: PARÁMETROS LAB DEL COLOR SUPERFICIAL DE LAS MUESTRAS INICIAL Y FINALES (SECAS) .....	69
FIGURA 31: COLOR SUPERFICIAL FINAL DE LAS MUESTRAS SECAS.....	70
FIGURA 33: PARÁMETROS E, C* Y H° OBTENIDOS DEL COLOR SUPERFICIAL DE LAS MUESTRAS FINALES.....	71
FIGURA 34: ÍNDICE DE PARDEAMIENTO (BI) CALCULADO PARA LAS MUESTRAS SECAS DE PURÉ DE PHYSALIS .....	74
FIGURA 35: COLOR SUPERFICIAL DE LAS MUESTRAS DURANTE LOS PROCESOS DE SECADO DE VENTANA DE REFRACTANCIA (RW50, RW60 Y RW70 .....	76
FIGURA 36: $\Delta E$ CALCULADO DURANTE LOS PROCESOS DE SECADO POR VENTANA DE REFRACTANCIA .....	77
FIGURA 37: C* DE LAS MUESTRAS SECADAS POR VENTANA DE REFRACTANCIA EN EL TIEMPO.....	78
FIGURA 38: H° DE LAS MUESTRAS SECADAS POR VENTANA DE REFRACTANCIA EN EL TIEMPO.....	79
FIGURA 39: EJEMPLO DE IMAGEN TÉRMICA DE AGUA CALIENTE EN UN BAÑO TERMORREGULADO, CON EL DETALLE DE LA ESCALA DE COLORES DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DETECTADA .....	81
FIGURA 40: IMÁGENES TÉRMICAS TOMADAS DURANTE EL PROCESO DE SECADO DE LRW50, EN DONDE (A) ES LA IMAGEN DEL AGUA A 50°C, (B) ES LA IMAGEN DE LAS MUESTRAS EN EL TIEMPO 0 MINUTOS Y (C), (D), (E) (F), (G), (H), (I), (J) CORRESPONDE A LA IMAGEN A 30, 60, 90, 120,150, 180, 210 Y 240 MINUTOS RESPECTIVAMENTE. 83	83
FIGURA 41: IMÁGENES TÉRMICAS TOMADAS DURANTE EL PROCESO DE SECADO DE LRW60, EN DONDE (A) ES LA IMAGEN DEL AGUA A 60°C, (B) ES LA IMAGEN DE LAS MUESTRAS EN EL TIEMPO 0 MINUTOS Y (C), (D), (E) (F) Y, (G) CORRESPONDE A LA IMAGEN A 30, 60, 90, 120 Y150, RESPECTIVAMENTE. ....	84

FIGURA 42: IMÁGENES TÉRMICAS TOMADAS DURANTE EL PROCESO DE SECADO DE LRW70, EN DONDE (A) ES LA IMAGEN DEL AGUA A 70°C, (B) ES LA IMAGEN DE LAS MUESTRAS EN EL TIEMPO 0 MINUTOS Y (C), (D), Y (E)) CORRESPONDE A LA IMAGEN A 30, 60 Y 90, RESPECTIVAMENTE. .... 84

## RESUMEN

### ***“Estudio del secado de *Physalis peruviana* Linnaeus por Ventana de Refractancia y comparación con secado convectivo y convectivo asistido con radiación infrarroja”.***

El proceso de secado por Ventana de Refractancia es una tecnología emergente que destaca por el uso de un film de plástico y de agua como la fuente de energía calórica para lograr la evaporación de la humedad, el estudio de esta tecnología para secar el fruto *Physalis*, que es un fruto poco industrializado, permite ampliar el conocimiento en Ventana de Refractancia y del *Physalis* con nuevas formas de su consumo. Para este estudio se secó puré de *Physalis* por Ventana de Refractancia (RW) (en equipo de escala de laboratorio e industrial) a 50, 60 y 70°C, y además se realizó el secado por aire convectivo y por aire convectivo asistido con luz infrarroja de 250, 500 y 1000 Watts, a temperaturas de 50, 60 y 70°C. Se obtuvo que el secado de RW presenta una cinética de secado característica de los procesos de secado convencionales, una relación inversa entre temperatura y tiempo, una difusividad de valores altos ( $D_{\text{eff}}$ :  $5,447 \times 10^{-8}$  a  $9,718 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ), se obtuvo un valor de  $E_a$  característicos del secado (45,267 kJ/mol), se encontró que el modelo de Weibull es el más apropiado el ajuste matemático. En cuanto a eficiencia RW es el secado que necesita mayor energía para calentar la materia ( $Q_w$ :  $4,604 \times 10^{08}$  y  $4,647 \times 10^{08}$  kJ), presenta un mayor consumo de energía térmica ( $EU_{\text{ter}}$ :  $5,982 \times 10^{06}$  -  $8,658 \times 10^{06}$  kJ) y tiene una eficiencia energética menor ( $\eta_e$ : 28,7 a 37,9%).

En cuando al efecto del proceso en el color, con todos los secados se produjo un cambio de color desde amarillo intenso con un tono rojizo con alta luminosidad a un producto de tono naranja con un tono más rojizo, menos saturado y con poca luminosidad.

El proceso de secado por Ventana de Refractancia es una opción al secado convencional que logra un producto con bajo contenido de humedad con características diferentes que permite ampliar las formas de consumo de los productos alimenticios y da la posibilidad de crear nuevos ingredientes.

## ABSTRACT

### **Study of drying of *Physalis peruviana* Linnaeus by Refractance Window Drying and comparison with convective air and convective air assisted with infrared radiation”**

The Refractance Window drying process is an emerging technology that stands out for the use of a plastic film and water as the source of the caloric energy to achieve the evaporation of moisture, a study of this technology to dry *Physalis* fruit, a fruit that is rarely used in industrialized process, allows to expand the knowledge in Refractance Window and *Physalis* for new ways for its consumption. For this study, *Physalis* puree was dried by Refractance Window (RW) (in laboratory and industrial scale equipment) at 50, 60 and 70 °C, and in addition drying was carried out by convective air and by convective air assisted with infrared light of 250, 500 and 1000 Watts, at temperatures of 50, 60 and 70 °C. the results obtained of the drying by RW, display a characteristic drying kinetics of conventional drying processes, an inverse relationship between temperature and time, a diffusivity of high values ( $D_{eff}$ :  $5,447 \times 10^{-8}$  to  $9,718 \times 10^{-8}$   $m^2s^{-1}$ ), a characteristic  $E_a$  value (45,267 kJ / mol), it was found that the Weibull model is the most appropriate for the mathematical adjustment. Regarding efficiency, RW is the drying that needs the most energy to heat the material ( $Q_w$ :  $4,604 \times 10^8$  and  $4,647 \times 10^8$  kJ), it presents the highest thermal energy consumption ( $EU_{ter}$ :  $5,982 \times 10^6$  -  $8,658 \times 10^6$  kJ) and has the lowest energy efficiency ( $\eta_e$ : 28.7 to 37.9%).

Regarding the effect of the process on the color, with all the drying process there was a color change from intense reddish yellow with high luminosity to an reddish orange color, with less saturation and luminosity.

The Refractance Window drying process is an option to the conventional drying methods that achieves a product with low moisture content and features that allows expanding the ways of consumption of food products and gives the possibility of creating new ingredients.

## 1. INTRODUCCIÓN

*Physalis* (*Physalis peruviana* Linnaeus) o goldenberry es un berry con un alto contenido de vitaminas A, B y C,  $\beta$ -caroteno, fósforo, hierro, compuestos bioactivos y, además presenta una alta actividad antioxidante (Valdenegro et al. 2012), su consumo provee beneficios a la salud y reduce el riesgo de adquirir ciertas enfermedades como el cáncer, malaria, asma, hepatitis, dermatitis y reumatismo , por lo cual, el *Physalis* se considera un alimento funcional (Ízli et al., 2014).

El secado es un proceso industrial aplicado con el objetivo de preservar los alimentos, aumentando su vida útil disminuyendo el contenido de humedad de los alimentos (y su actividad de agua) (Muñoz-López et al., 2018), este proceso involucra la remoción de agua desde una fuente húmeda por la inducción de cambios de fase del agua desde líquido a vapor gracias a la aplicación de calor, debido a esto el secado consume grandes cantidades de energía, por lo que el mayor reto es remover al agua en un modo que sea lo más eficiente posible, con un mejor control de la calidad, mínimo impacto ambiental, menor capital y costos de operación (Sabarez, 2015), por lo cual se estudia el secado con nuevas tecnologías que puedan cumplir con este objetivo.

El secado de Ventana de Refractancia es una nueva tecnología para evaporar el agua de alimentos líquidos o semi-líquidos (Pavan et al., 2012), es una técnica de contacto indirecta, en la que se transmite calor al alimento desde agua caliente a través de un film de plástico de Mylar™ a través de los mecanismos de conducción y por radiación, lo cual permite que los alimentos se sequen a temperaturas moderadas por tiempos de secado cortos (Nindo & Tang, 2007).

El objetivo del trabajo es estudiar el secado de puré de *Physalis* por el método de ventana de refractancia y compararlo con otros métodos de secado.

## 2. *Physalis Peruviana* L

*Physalis peruviana* (*P. peruviana* Linnaeus), también conocida como goldenberry, es una fruta que se consume fresca o procesada con técnicas poco innovadoras como en syrup, mermeladas o como ingrediente de salsas o snack (Puente et al., 2011), procesar goldenberry con una nueva técnica para obtener nuevos alimentos con mínima pérdida de calidad podría resultar en un aumento en su consumo y la transformaría en un cultivo prometedor.

*P. peruviana* es una planta perteneciente a la familia Solanaceae y al género *Physalis*, la fruta es un berry de forma ovoide de un diámetro entre 1.25 a 2.50 cm, peso de 4 a 10 g, contiene en su interior aproximadamente entre 100 a 200 pequeñas semillas (Puente et al., 2011) con forma de disco ovaladas y planas de color café claro, distribuidas céntrica y periféricamente en la fruta (Nocetti et al., 2020), la fruta está cubierta por una piel externa cerosa que limita la permeabilidad de humedad, compuesta por una mezcla heterogénea de lípidos depositados en la superficie (Junqueira et al., 2017) y a su vez al fruto lo cubre un calix (estructura en forma de cúpula formada por sépalos y hojas) que lo protege de insectos, aves, enfermedades y condiciones climáticas adversas y su presencia en la post cosecha tiene un efecto positivo en su preservación y características (Nocetti et al., 2020). En la madurez la fruta pasa de un color verde a naranja por la descomposición de clorofila y acumulación de carotenoides, se produce un ablandamiento progresivo y toma un sabor dulce similar al de la uva (Valdenegro et al., 2012).

La pulpa de *Physalis* contiene vitaminas A, B y C,  $\beta$ -caroteno, fósforo y hierro (Valdenegro et al., 2012). La fruta contiene un 15 % de azúcares solubles (mayormente azúcares), entre 0,05-0,3% de proteína, 0,15-0,2% de lípidos, 19,6% de carbohidratos, 4,9% de fibra (alto contenido de fibra dietaria) y 1% de cenizas (İzli et al., 2014). Además, contiene pectina, la que actúa como regulador intestinal (Ramadan, 2011), y cuenta con la presencia de compuestos bioactivos que proveen beneficios a la salud y reducen el riesgo de algunas enfermedades como el cáncer, malaria, asma, hepatitis, dermatitis y reumatismo, lo que hacen que la fruta sea considerada un alimento funcional (İzli et al., 2014). Extractos de *Physalis* muestran

que la planta presenta capacidad antioxidante, y también actividad anti-hepatotóxica, efectos antiproliferativos en células de hepatoma, y actividad antiinflamatoria e antidiabética (Valdenegro et al., 2012).

### **3. Proceso de Secado**

El proceso de secado es un método antiguo para la preservación de alimentos e importante en el procesamiento de alimentos (İzli et al., 2014). Este proceso consiste en disminuir el contenido de humedad de los alimentos, es aplicado a alimentos con un contenido de humedad mayor al 80% y que son considerados como “altamente perecederos”, los beneficios de secar alimentos incluyendo el de alargar la vida útil del alimento, es la reducción de costos de embalaje; maniobra y transporte, extiende la posibilidad de mantener disponible el alimento en todas las estaciones y produce un mayor rango de productos para los consumidores (Moses et al., 2014), pero el secado convencional (mayormente realizado en secadores de aire convectivo) tiene la desventaja de que produce efectos negativos en la calidad del producto seco, en términos de los atributos nutricionales, funcionales y sensoriales como resultado de la transferencia de calor por los modos de conducción y convección (Moses et al., 2014), debido a esto nuevas tecnologías alternativas al secado convencional han surgido con el objetivo de que con su aplicación de ellas se disminuya el contenido de humedad, se logre un menor impacto en la calidad del alimento, el proceso sea menos contaminante, tenga mejor capacidad, mejor control de proceso, mejores costos económicos, seguridad operaciones y el tiempo de secado sea menor (Moses et al., 2014).

#### **3.1. Secado convectivo por aire caliente (HAD, Hot Air Drying)**

La técnica de secado convectiva por aire caliente (HAD) consiste en hacer que aire caliente fluye a través de la superficie del alimento húmedo (Bennamoun & Li, 2018), los productos obtenidos tienen una larga vida útil, pero tiene una calidad menor a la original, ya que se produce una drástica reducción de volumen, deformación

(Barbosa et al., 2015), cambios en el color, los valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  disminuyen luego del secado debido a degradación de carotenoides, las muestras secas pueden ser significativamente más oscuras (reducción de  $L^*$ ) debido a reacciones no enzimáticas y de Maillard que ocurren inevitablemente durante el secado convectivo (İzli et al., 2014). Además, tiene como desventaja los relativamente largos tiempos de procesamiento, las altas temperaturas y la alta velocidad de flujo de aire (İzli et al., 2014).

En los secadores convectivos el aire es succionado por un ventilador para hacerlo pasar por un banco de calentadores (eléctricos, intercambiadores de calor, mecheros de gas natural u otros métodos que suplen calor), con una velocidad constante relativamente alta (1 – 10 m/s) y luego este aire pasa por el producto (Kerr, 2013). La energía es transferida a la superficie del producto por convección (

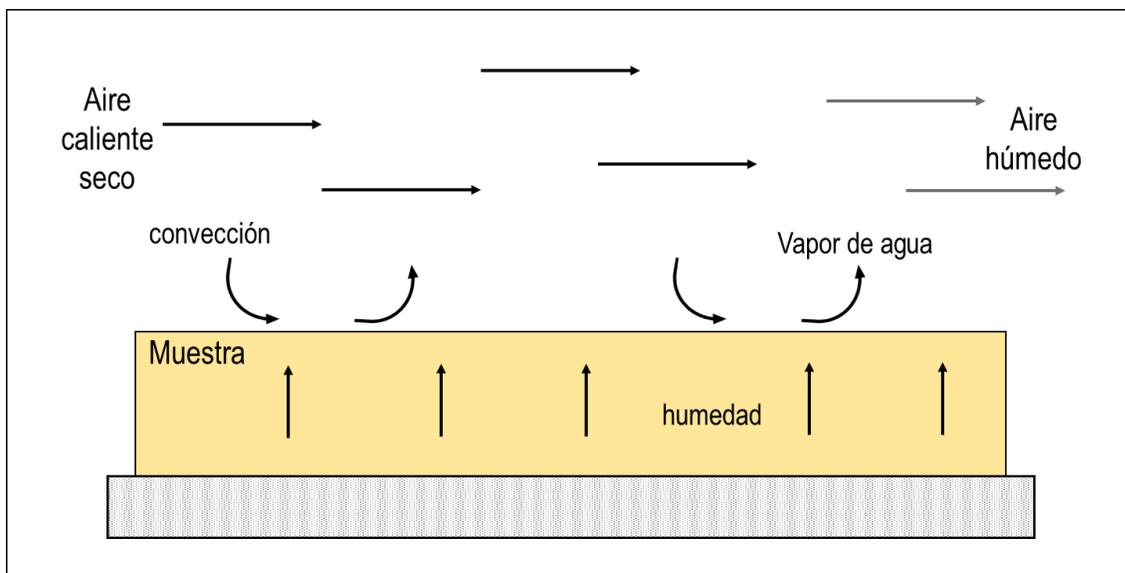


Figura 1) y luego en el interior del producto es transferida simultáneamente por difusión o convección, dependiendo de la estructura del producto, el flujo de calor hace que la temperatura del producto aumente y el agua se evapore (Castro et al., 2018). La humedad se transfiere desde la superficie del producto al aire por convección como vapor de agua y en el interior del producto es transferida por difusión, convección o capilaridad, El agua se remueve por transferencia de calor, masa y momentum simultáneamente (Castro et al., 2018).

La velocidad de secado y las propiedades del producto seco dependen de la temperatura del aire, humedad, velocidad, la dirección de flujo del aire y condiciones internas del producto como la geometría, espesor, forma y estructura (Castro et al., 2018).

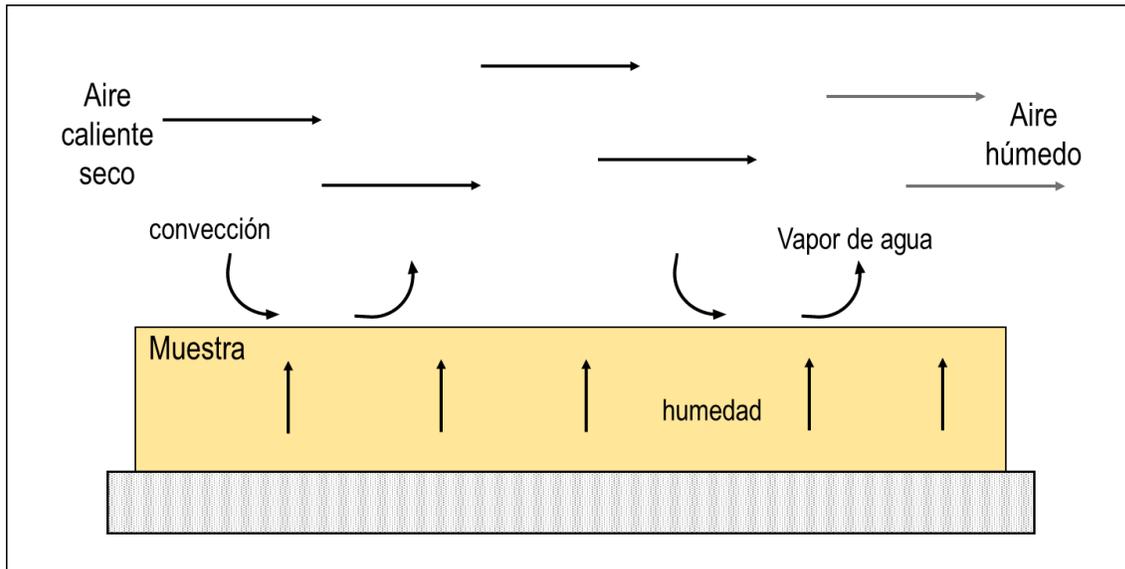


Figura 1: Transferencia de calor desde el aire caliente a la muestra húmeda en un secador convectivo de aire caliente

### 3.2. Secado convectivo asistido con luz infrarroja (Hot Air Drying – InfraRed)

El secado asistido con luz infrarroja consiste en secar el producto húmedo con aire caliente y con radiación emitida por una ampolleta de luz infrarroja.

En el secado asistido con infrarrojo, la radiación infrarroja (IR) es utilizada debido a los beneficios que aporta al secado, entre los que se cuenta el aumento la capacidad de transferencia de calor; calentamiento instantáneo debido a la penetración directa del calor; alta eficiencia energética; tratamientos de calentamiento rápidos; respuesta de regulación rápida; mejor control de procesos; no hay calentamiento de aire circundante; equipos compactos; calentamiento uniforme; mejor conservación de vitaminas y la menor posibilidad de que se pierda sabor por daño generado por calor (Rastogi, 2012). La aplicación de infrarrojo con aire caliente es más eficiente

que calentamiento por infrarrojo o aire caliente por separado, ya que la combinación produce un efecto sinérgico (Hebbar et al., 2004).

La radiación IR es parte del espectro electromagnético en el rango de longitud de onda entre 0,5 y 1000 mm, cae entre las regiones de luz visible (0,38-0,78  $\mu\text{m}$ ) y microondas (1- 1000 mm), la International Commission on Illumination (CIE) recomienda la división de radiación IR en tres regiones: radiación IR cercana (NIR) en el rango 0,7-1,4  $\mu\text{m}$ , media (MIR) entre 1,4-3,0  $\mu\text{m}$  y radiación IR lejana (FIR) en el rango de 3,0-1000  $\mu\text{m}$  (Pan et al., 2014), es este último es el más ventajoso para alimentos (Rastogi, 2012).

El efecto del calentamiento por aire caliente asistido por IR en alimentos líquidos es debido al calentamiento de una lámina delgada del material en la superficie producida por la radiación infrarroja (Rastogi, 2012), la absorción de radiación que penetra incrementa la vibración molecular y genera calor en la superficie y capas internas del material simultáneamente, este calentamiento rápido incrementa la velocidad de migración de humedad hacia la superficie (Hebbar et al., 2004), pero la radiación no puede penetrar profundamente y solo se calienta a pocos milímetros por debajo de la superficie de la muestras. La energía absorbida es transferida por conducción al resto del alimento (Rastogi, 2012). Al mismo tiempo el flujo de aire convectivo remueve la humedad de la superficie y disminuye su temperatura, resultando en el incremento de transferencia de masa (

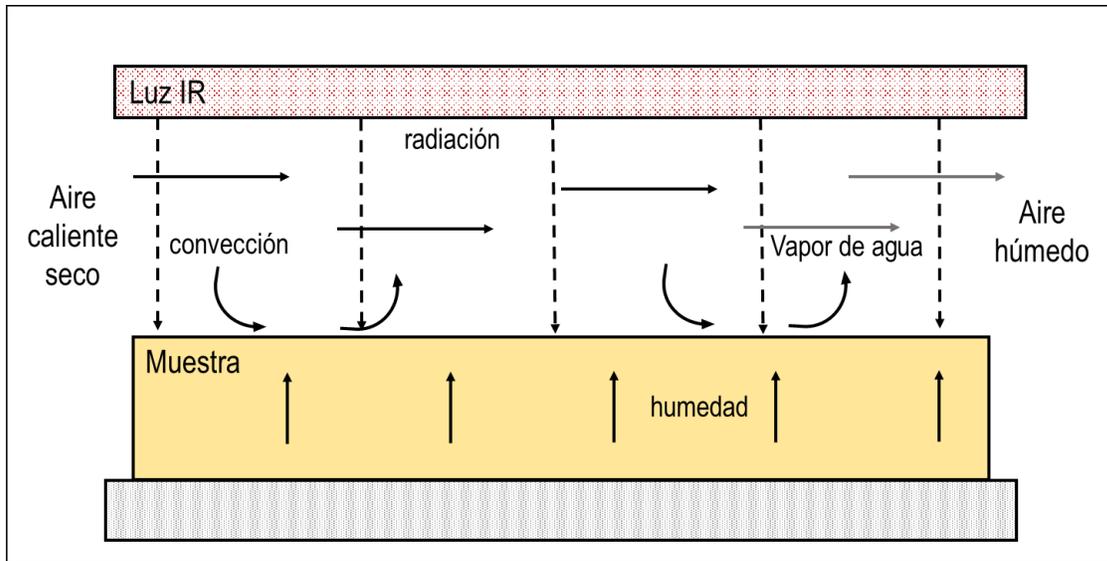


Figura 2) (Hebbar et al., 2004).

Debido a que la luz IR calienta la superficie, el producto se enfría rápidamente luego de terminar el tratamiento, con lo que se producen menores cambios en la calidad del alimento debido calentamiento por conducción despreciable, y la energía de radiación que penetra no hace una contribución significativa al calentamiento interno. En adición, las pocas corrientes convectivas (debido a poca profundidad en muestras) resultan en bajas velocidades de flujo. Por lo tanto, el comportamiento térmico de muestras líquidas parece ser en su totalidad a conducción interna, seguido de transferencia de calor convectiva y radiantes externa en la superficie (Rastogi, 2012).

La energía IR no depende del aire para ser transmitida y es convertida a calor en absorción por el material en calentamiento. Debido a que el aire, y los gases en general, absorben muy poca energía IR, el proceso de calentamiento por infrarrojo provee transferencia de calor eficiente y sin contacto entre la fuente de calor y el material a calentar (Pan et al., 2014).

Materiales de un alto contenido de humedad pueden ser secados rápidamente usando radiación IR si estos son propagados en una superficie con un espesor pequeño, o reducidos en espesor, no es aplicable fácilmente a alimentos con forma compleja. Para obtener una alta eficiencia de secado la longitud de onda emitida

por el IR debe ser que las bandas de absorción de las moléculas de agua del alimento. Además, la energía IR debe ser aplicada uniformemente (Pan et al., 2014). Los métodos de secado combinados (IR con aire caliente, IR secuencial y liofilización, IR con vacío, etc.) son más eficientes que secado solo por radiación o convección (Pan et al., 2014). Además, la radiación IR es utilizada en la inactivación de patógenos en los alimentos (Rastogi, 2012).

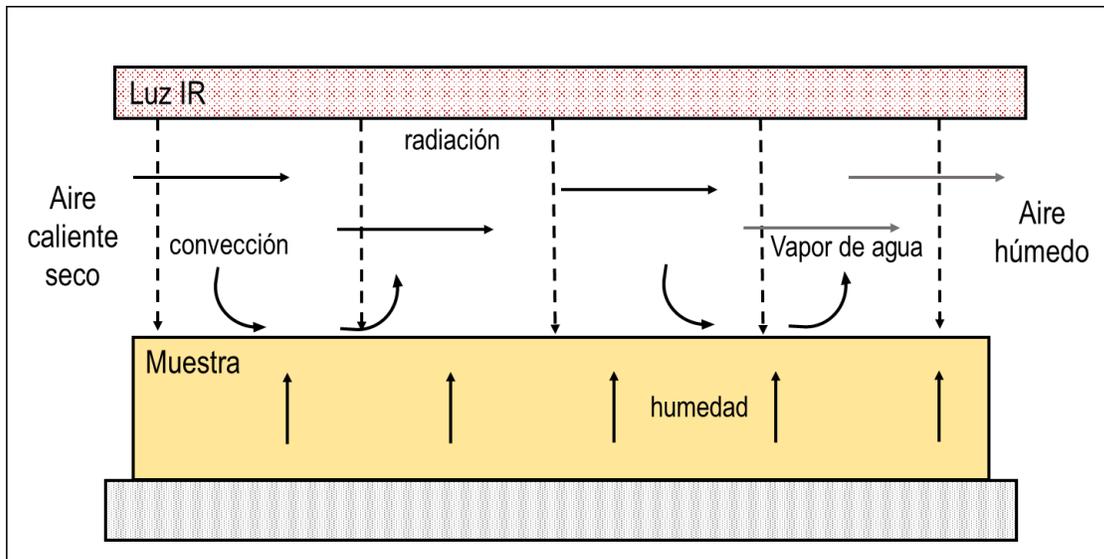


Figura 2: Transferencia de calor en un secador de aire caliente asistido con radiación infrarroja.

### 3.3. Secado por Ventana de Refractancia (RW, Refractance Window™)

El método de Ventana de Refractancia (RW™) es utilizado para secar purés y láminas de frutas y vegetales (Raghavi et al., 2018), es especialmente adecuado para productos líquidos y semilíquidos (Pavan et al., 2012). El equipo en el que se realiza es en un evaporador de Ventana de Refractancia o Refractance Window™ (RW) evaporator desarrollado por MCD Technologies, es una tecnología relativamente simple, económica y puede usarse en un amplio rango de productos (Nindo et al., 2004).

El método se basa en que en el agua ocurren los tres métodos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación): la pérdida de calor o energía desde el

agua hacia lo que lo rodea es a través de conducción o evaporación con convección y radiación como procesos internos. Si una capa de un material es colocada en la superficie del agua, la pérdida de energía solo se realiza por conducción, pero si el material colocado es un film de plástico llamado Mylar™, ocurre transferencia de calor por radiación, si es que ambas capas del film están en contacto con material húmedo (el agua caliente en una cara y el alimento líquido en la cara contraria) (Figura 3). Esto permite que el calor radiante pase desde el agua hasta el material húmedo a través del material, a este proceso se llama la “ventana” de oportunidad de transferencia de energía (Phillip., 2004).

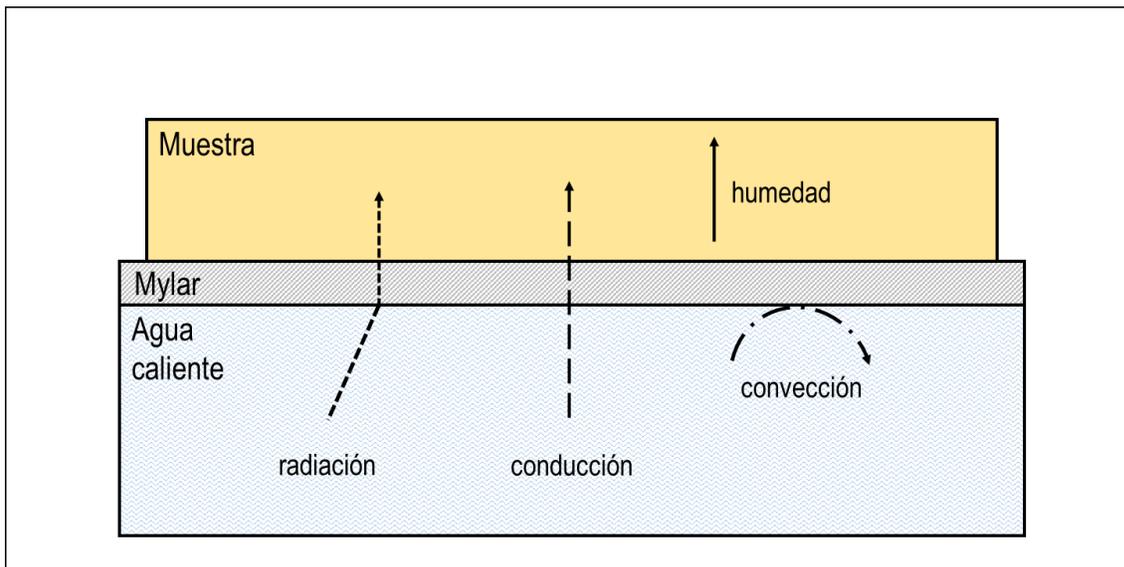


Figura 3: Transferencia de calor en el secado por Ventana de Refractancia.

El término “ventana” se utiliza como analogía para describir las etapas del proceso de secado de Ventana de Refractancia. Las etapas son (

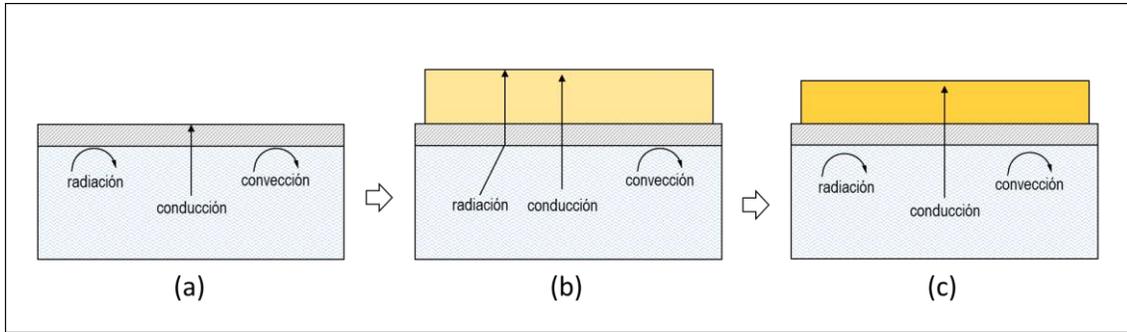


Figura 4):

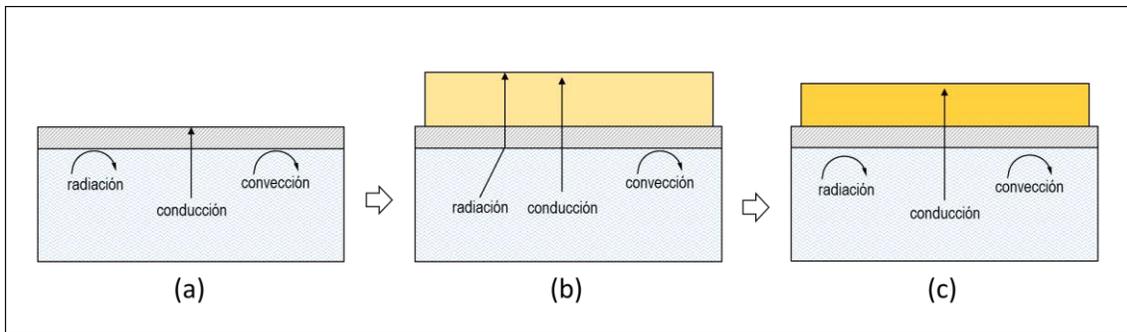


Figura 4: Proceso de “ventana” de transferencia de calor en RW.

(a) Como se ve ilustrado en la

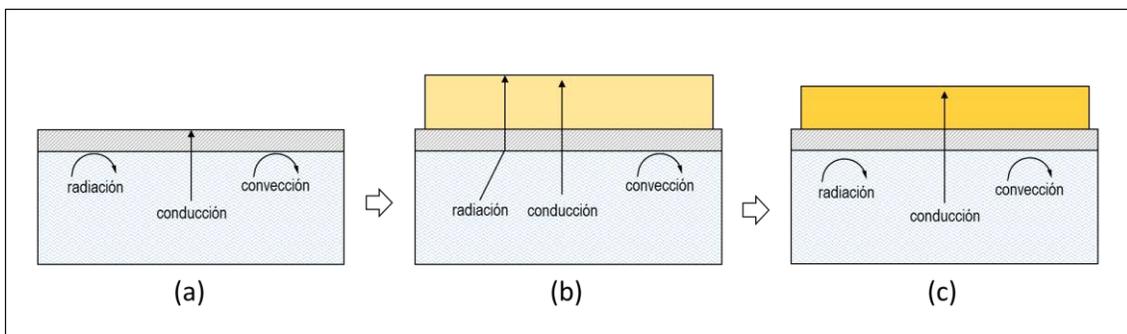


Figura 4, en la primera etapa del proceso, se encuentra el film Mylar™ suspendido sobre agua caliente en un estanque, solo una cara del film está en contacto con material húmedo por lo que la transferencia de calor ocurre solo por conducción, el calor por radiación no es transferido, así que se dice que la “ventana” de transferencia de energía radiante está cerrada (Phillip., 2004).

- (b) En la segunda etapa, un alimento líquido se ha colocado sobre el film de Mylar™, por lo que el film tiene contacto con material húmedo en sus dos caras, por lo que se abre la “ventana” de transferencia de energía y el calor por radiación es transferido desde el agua caliente a través del film de plástico hasta el alimento, el cual se calienta por conducción y radiación para poder secarlo. A medida que el alimento se seca y por ende la humedad en contacto con el film disminuye, la “ventana” se cierra progresivamente (Phillip., 2004).
- (c) En la última etapa del proceso el alimento está seco, por lo que el film vuelve a tener material húmedo solo por una de sus caras, entonces la “ventana” de transferencia de calor está cerrada y el calor por radiación ya no es transferido, el film y el alimento se calientan solo por el modo de conducción (Phillip., 2004).

Los componentes principales del sistema de secado de Ventana de Refractancia son el agua caliente circundante en un estanque y la capa de material de las superficies (el film de Mylar™ es el más utilizado) (Raghavi et al., 2018). El agua a presión atmosférica normal es calentada a la temperatura requerida, usualmente por debajo de su punto de ebullición (96-98 °C) y se mantiene a esa temperatura para evitar la formación de burbujas que pueden reducir la transferencia de calor (Nindo et al., 2004). En RW utilizar mayores temperaturas resultan en mayores velocidades de secado en películas de producto con espesor pequeño (Zotarelli et al., 2015), Además, debido a que el método de secado usa temperaturas de secado moderadas por tiempos de secado corto, se obtienen productos de alta calidad. (Pavan et al., 2012).

RW Es un desarrollo relativamente nuevo que cae en la categoría de técnica de contacto, indirecta, o de secado en film, no ocurre contaminación cruzada debido a que el producto no está en contacto con el medio de transferencia de calor (agua caliente), sino que está en contacto con un film de plástico (Mylar) (Nindo & Tang, 2007).

Los sistemas de secado RW™ tienen una mayor eficiencia térmica, comparando con sistemas de secado de tambor o por aire caliente. En cuanto a la calidad de los

productos secados, esta se puede comparar a la de los productos de liofilización, pero el costo de RW es menor y requiere menor energía (Raghavi et al., 2018). La tecnología de RW ha sido utilizada para procesar pulpas de varias frutas y vegetales con el objetivo de obtener polvos, los resultados de estudios en que se compara RW con otros tipos de secado (secado en spray, secado en tambor y liofilización), dan como resultado que en pulpas de frutilla y puré de zanahoria, evaluando color, retención de carotenoides, vitamina C y compuestos volátiles (los dos primeros de gran presencia en la fruta de goldenberry), la pérdida de carotenoides fue mayor en el secado en tambor (56%) y menor en liofilización (49%), RW se acerca mucho a esta última con una pérdida de solo un 8,7%, este resultado es similar en la retención de ácido ascórbico; RW y liofilización dan resultado muy similares, con excepción en la pérdida de compuestos volátiles, debido al uso de temperaturas mayores, aun así los productos obtenidos por RW tiene una calidad comparable con los productos de liofilización (Zotarelli et al., 2015).

### **3.3.1 Mylar ®**

El film de MYLAR ® es un film de plástico poliéster que tiene la cualidad de transmitir energía por conducción y radiación debido a sus propiedades ópticas (Shende & Datta, 2019), tiene una transmitancia total mínima entre de las longitudes de ondas del rango de 6,5 y 14,5  $\mu\text{m}$ ) (Phillip., 2004), el porcentaje de transmitancia de calor por radiación es mayor a menor espesor de film y cuando la fuente de calor, en el caso de RW agua, tiene una mayor temperatura (Shende & Datta, 2019). Esta propiedad óptica es la que llevo a Richard Magoon a utilizar este film para inventar y patentar el proceso de Ventana de Refractancia (Shende & Datta, 2019).

#### 4. Transferencia de calor y masa durante el proceso de secado

Los procesos de la industria alimentaria son de alto consumo de energía, en los procesos de secado ocurre la transferencia de calor, la cual en general está dominada por tres mecanismos de transporte (Farid, 2019):

- **Conducción:** Se refiere a la transferencia de calor a través de un medio estacionario. La transferencia de masa equivalente a la conducción de calor, es la difusión molecular a través de un medio estacionario (Berk, 2018b).
- **Convección:** Este mecanismo de transferencia ocurre cuando el calor viaja junto con un fluido en movimiento. En la transferencia de masa, la transferencia por convección se refiere a la situación por la cual la difusión molecular ocurre en simultáneo con el flujo de masa o bulk Flow (Berk, 2018b). Se pueden definir dos tipos de convección:
  - Convección natural o libre: el movimiento es causado por la transferencia de calor o masa por sí misma, comúnmente por diferencias de densidad. Si consideramos una estufa caliente en un ambiente helado, el aire en contacto con la estufa es calentado, se expande, se vuelve menos denso, se mueve hacia arriba y es reemplazado por aire más helado y pesado. Las "corrientes de convección" circulares naturales continuarán moviendo aire mientras existan diferencias de temperaturas en el área (Berk, 2018b).
  - Convección forzada: El movimiento del fluido (flujo) es causado por factores de transferencia independientes. Considerando el caso de la estufa en la sala helada, si se coloca un ventilador tendríamos convección forzada (Berk, 2018b).
- **Radiación:** Es la transferencia de calor en la forma de energía electromagnética. A diferencia de los otros dos mecanismos, la transferencia

de calor por radiación no necesita de la presencia de un medio material entre dos puntos para que ocurra la transferencia (Berk, 2018b).

El termino radiación cubre un amplio número de fenómenos en los que el transporte de energía se realiza en la forma de ondas. para la transferencia de calor se ocupa el termino radiación térmica, que se refiere a la radiación electromagnética en el rango de longitud de onda entre  $10^{-7}$  a  $10^{-4}$  m y abarca mayormente el rango de la radiación infrarroja (Berk, 2018b).

En muchos procesos en donde ocurre transferencia de calor ocurre simultáneamente un fenómeno de transferencia de masa de humedad o de nutrientes, en los procesos de secado (liofilización, secado en spray, por aire, etc.) la transferencia de calor está acompañada por la transferencia de humedad, lo que conlleva a su vez un cambio de fase, la evaporación, lo que produce la transferencia de vapor (Farid, 2019).

El proceso de secado de alimentos es un proceso de transferencia de masa y de calor (Pavón-Melendez, 2002), fenómenos que ocurren en el secado por los siguientes mecanismos (Pavón-Melendez, 2002):

1. Transferencia de calor y difusión de masa por conductividad, simultáneamente (Pavón-Melendez, 2002).
2. Transferencia de calor por convección (y posiblemente por radiación) en el aire y en la superficie de contacto alimento-aire, lo que es igual al flujo de conducción de calor en el alimento (Pavón-Melendez, 2002).
3. Transferencia de masa por convección en el aire en contacto con la superficie aire-alimento, lo que es igual al flujo de difusión de agua en el alimento (Pavón-Melendez, 2002).

Cuando el alimento es secado por aire caliente o vapor sobrecalentado, el calor se transfiere desde el fluido caliente a la superficie del alimento por convección, en

alimentos sólidos el calor se transfiere por el mecanismo de conducción y el vapor es transferido por difusión u otro mecanismo de través de los poros (Farid, 2019).

En la práctica, en el proceso de transferencia pueden estar involucrado más de un mecanismo a la vez, el calor transferido por la combinación de convección y radiación es muy común. Por ejemplo, En un horno de cocina, el calor es transferido al producto por las dos, aire caliente por convección y por cuerpos calientes por radiación (Berk, 2018b).

## 5. Curvas de secado

Las curvas de secado expresadas como el contenido de humedad (X) versus tiempo (t), obtenida por la pérdida de peso y el tiempo durante el secado o expresadas como la razón de humedad (MR) versus tiempo son útiles para describir la cinética ocurrida durante el proceso de secado (Bennamoun & Li, 2018). En proceso de secado se puede medir el peso de las muestras en función del tiempo, con estos datos y con el porcentaje de humedad inicial, se puede calcular el contenido de humedad de las muestras (Kerr, 2019) y construir una un gráfico de contenido de humedad versus tiempo, para analizar el proceso de secado en el tiempo, una curva típica del proceso de secado se puede ver en la Figura 5. Para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{W_0 \times (100 \times X_0)}{100} \quad (1)$$

$$X = \frac{W - S}{S} \quad (2)$$

El contenido de humedad inicial es  $X_0$ , el peso inicial es  $W_0$ , el contenido de sólidos de las muestras es S, el peso es W y X es el contenido de humedad en base seca expresado como gramos de  $H_2O$ / gramos de sólidos en un tiempo t.

Las curvas de secado son modeladas de modo que se pueden distinguir tres regiones o fases típicas (Berk, 2018a):

**Fase de calentamiento:** En esta fase el producto absorbe la energía del medio de calentamiento y su temperatura aumenta (Breslin, 2020). Hay un aumento de la velocidad de secado a medida que se remueve el agua, se puede considerar como un acondicionamiento de la muestra al secado (Berk, 2018a).

**Fase de velocidad constante:** En esta fase la velocidad permanece casi constante a medida que el agua es removida, la condición constante se produce si las condiciones externas del proceso permanecen constante (temperatura, aire y humedad) (Berk, 2018a) y se mantiene mientras la superficie del producto permanece saturada con agua, que se evapora desde la superficie (Kerr, 2019) y se transporta desde el interior hasta la superficie por difusión para reemplazar la perdida, es la evaporación de agua desde la superficie el mecanismo que controla esta fase (Berk, 2018a). A medida que las muestras se secan su contenido de humedad disminuye y se acerca al contenido de humedad crítico ( $X_c$ ), alcanzado este punto la velocidad de secado empieza a disminuir (Kerr, 2019).

**Fase de velocidad decreciente:** Se produce por debajo del contenido de humedad crítico, a medida que el contenido de humedad disminuye esta se acerca al contenido de humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ), a partir de este punto la velocidad de secado disminuye a medida que se elimina el agua, el producto se vuelve más seco y la transferencia de agua desde el interior del producto hasta la superficie disminuye continuamente (Kerr, 2019) debido a que la resistencia del agua a moverse aumenta (a menor contenido de humedad mayor es la resistencia del agua) (Breslin, 2020), el movimiento de agua como líquido o gas en el interior de producto se realiza por capilares, espacio intracelulares o espacios vacíos en el interior (Kerr, 2019), es por lo cual, el transporte de agua interno es el mecanismo limitante de la velocidad (Berk, 2018a). En el producto su superficie ya no se encuentra saturada de agua por lo que aumenta la temperatura interna del producto (Berk, 2018a).

Las fases del proceso de secado se pueden apreciar en la Figura 5 de una curva de secado típica.

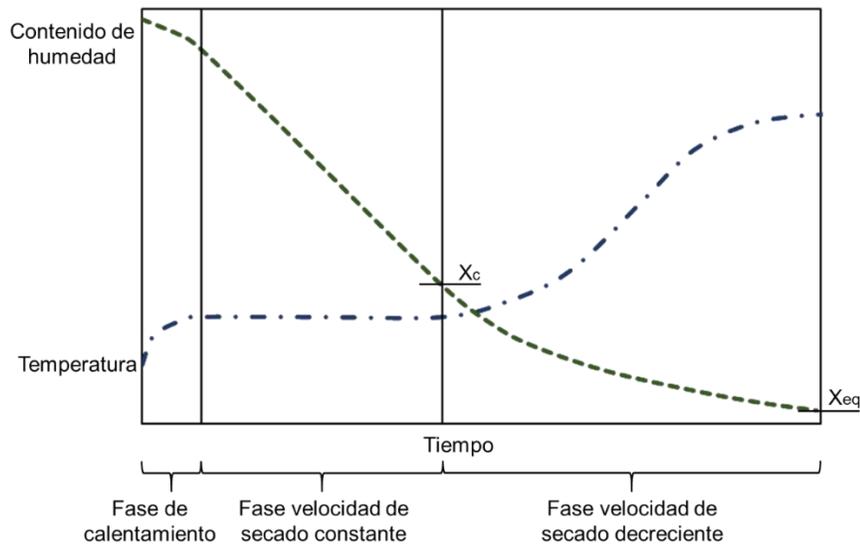


Figura 5: Curva de secado típica de la variación de la humedad en el tiempo y la evolución de la temperatura durante el secado, muestra las fases de secado, velocidad constante y decreciente de secado, humedad crítica y humedad de equilibrio.

### 5.1. Razón de Humedad MR

La razón de humedad (MR, moisture ratio) de las muestras deshidratadas se calculó con la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

Donde M, \$M\_0\$ y \$M\_e\$ son el contenido de humedad a un tiempo dado, el contenido de humedad inicial y el contenido de humedad en equilibrio (kg/kg de materia seca), respectivamente (Zhang et al., 2016). MR es la razón de humedad adimensional, la cual es utilizada para graficar las curvas de secado debido a que su valor inicial para todos los experimentos es un valor uniforme igual a 1 (Afolabi et al., 2015).

### 5.2. Estimación de la difusión efectiva de humedad (\$D\_{eff}\$)

El coeficiente de difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) refleja la propiedad de deshidratación de los materiales cuando están expuestos a ciertas condiciones de secado, y en el modelamiento de procesos de secado de materiales biológicos es una propiedad de transporte en función de la temperatura y del contenido de humedad del material sometido al proceso de secado (Zhang et al., 2016), este modelo teórico es el más utilizado para investigar el proceso de secado en capa fina de diferentes tipos de alimentos (Doymaz, 2004). Para estimar el coeficiente de difusividad efectiva se utiliza la segunda ley de Fick simplificada y se considera una difusión de humedad constante, serie geométrica infinita y una distribución uniforme de la humedad inicial (Zhang et al., 2016). La solución analítica de la segunda ley de Fick es:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

En donde  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusividad efectiva ( $m^2/s$ ),  $L$  es la mitad del espesor de las muestras ( $m$ ),  $n$  es el integrador positivo,  $t$  es el tiempo de secado ( $s$ ). Para procesos de un período largo de secado, la Ec.4 se puede simplificar a la siguiente ecuación:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (5)$$

El coeficiente de difusión efectiva ( $D_{eff}$ ) se puede estimar con el método de la pendiente, en donde se obtiene la pendiente con la regresión lineal de  $\ln(MR)$  y el tiempo de secado (Zhang et al., 2016), la ecuación de la pendiente obtenida es:

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (6)$$

Al despejar  $D_{eff}$  de la pendiente obtenida como resultado del ajuste lineal se puede calcular el valor del coeficiente de difusión de humedad efectiva (Zhang et al., 2016).

### 5.3. Energía de activación ( $E_a$ ) y $D_0$

La energía de activación ( $E_a$ ) está definida como la representación de la energía que debe tener una molécula en su estado inicial de un proceso para poder tomar parte de una reacción, ya sea química o física (Jensen, 1985), para un proceso de secado la  $E_a$  está definida como la energía necesaria para inicial la difusión de humedad desde las regiones internas de la materia sometida al proceso (Torki-Harchegani et al., 2017) y es un factor que forma parte de la ecuación de Arrhenius (Ec. 7) para el cálculo de la difusión del proceso, esta ecuación es utilizada para describir el efecto de la temperatura de secado en el coeficiente de difusividad efectiva de la humedad y así obtener un mejor ajuste de la curva predicha con la curva de datos experimentales (Zhang et al., 2016). Se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

En donde  $D_0$  es el factor de Arrhenius que generalmente se define como el coeficiente de difusión a temperatura alta infinita  $m^2/s$ ,  $R$  es la constante universal de los gases ( $8,314 \times 10^{-3}$  kJ/mol·K),  $T$  es la temperatura absoluta (K) y  $E_a$  es la energía de activación para difusión kJ/mol (Erbay & Icier, 2010).

En la ecuación de Arrhenius  $E_a$  es el factor que mide el efecto de la temperatura del proceso de secado en el coeficiente de difusión (Zhang et al., 2016), un mayor valor se  $E_a$  significa una mayor sensibilidad de  $D_{eff}$  a la temperatura (Erbay & Icier, 2010). La  $E_a$  se obtiene desde datos experimentales de secado, de la gráfica del logaritmo natural de  $D_{eff}$  versus el logaritmo del inverso de la temperatura del proceso ( $\ln[D_{eff}]$  v/s  $\ln[1/T]$ ), que muestran una correlación lineal de la cual se calcula  $E_a$  por regresión lineal (Zhang et al., 2016).

## 6. Modelamiento matemático del proceso de secado

Un modelamiento preciso del comportamiento de la muestra es importante para el estudio de la cinética de secado (Zhang et al., 2016), ejemplos de modelos matemáticos usados para explicar el proceso de secado en capa fina de alimentos son:

### 6.1 El modelo de Newton

El modelo de Newton es utilizado para modelar el secado de capa fina, en donde la curva de secado ( $M_R$  versus tiempo) se ajusta a la ecuación 8 (Salehi & Kashaninejad, 2018):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (8)$$

En donde  $k$  es la constante del modelo y  $t$  es el tiempo en segundos.

### 6.2 El modelo de Henderson y Pabis

El modelo de Henderson y Pabis o modelo exponencial bi-paramétrico es el primer término de una serie de soluciones de la segunda ley de Fick (Zhang et al., 2016), puede escribirse como:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) \quad (9)$$

Donde  $a$  y  $k$  son las constantes del modelo y  $t$  es el tiempo en segundos.

### 6.3 El modelo de Page

El modelo de Page es una modificación empírica que corrige algunas deficiencias del modelo de Lewis (Zhang et al., 2016), se escribe de la forma:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n) \quad (10)$$

Donde k y n son las constantes del modelo y t es el tiempo en segundos.

#### 6.4 El modelo de Page modificado

El modelo de Page fue modificado para explicar las características del secado de materiales biológicos (Zhang et al., 2016), con lo que se obtuvo el modelo de Page modificado, el cual se expresa como:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-(kt)^n) \quad (11)$$

Donde k y n son las constantes del modelo y t es el tiempo en segundos.

#### 6.5 El modelo de Weibull

El modelo representa la distribución de la fuerza de ruptura de los materiales y describe el comportamiento de los sistemas o eventos que tienen algún grado de variabilidad (Corzo et al., 2008). La ecuación del modelo es la siguiente:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (12)$$

Donde  $\alpha$  es el parámetro de escala del modelo,  $\beta$  es el parámetro de forma y t es el tiempo (Corzo et al., 2008).

#### 6.6 análisis de los modelos matemáticos

Las constantes y los coeficientes de la razón de secado de todos los modelos se calcularon usando el análisis de regresión de diferencia de cuadrados no lineales. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es el factor principal para juzgar el ajuste de una ecuación de simulación para modelar muestras en una curva de secado, pero también existen los siguientes factores:

### 6.6.1 Valor Chi-Cuadrado ( $X^2$ )

Se calculó con la siguiente ecuación:

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (13)$$

Donde  $MR_{exp,i}$  se refiere al contenido de humedad medido,  $MR_{pre,i}$  es el contenido de humedad predicho,  $N$  es el número de observaciones en un proceso de secado y  $z$  es el número de constantes en el modelo (Zhang et al., 2016).

### 6.6.2 Suma de cuadrados del error residuales (SSE)

La suma de cuadrados del error residual (SSE) es un parámetro estadístico usado para determinar la calidad del ajuste de los modelos matemáticos para describir el proceso de secado, este puede ser calculado con la ecuación (Doymaz, 2004):

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pre})^2 \quad (14)$$

Donde  $MR_{exp}$  se refiere al contenido de humedad medido,  $MR_{pre}$  es el contenido de humedad predicho y  $N$  es el número de observaciones en un proceso de secado.

Una ecuación con un alto grado de ajuste debe tener un valor bajo de chi-cuadrado ( $X^2$ ) (Zhang et al., 2016) y bajo valor de suma de cuadrados residuales (SSE) (Doymaz, 2004).

## 7. Eficiencia de secado (DE) y Eficiencia energética ( $\eta_e$ )

La eficiencia de secado es definida como la razón entre la energía utilizada para calentar el producto para la evaporación de humedad y el consumo total de energía. Se calcula con la ecuación (Motevali et al., 2014):

$$\text{Drying efficiency} = \frac{Q_w + Q_m}{EU(\text{ter} + \text{mec})} \quad (15)$$

La eficiencia energética ( $\eta_e$ ) es la razón entre la energía utilizada para evaporar la humedad desde las muestras y la energía total consumida. Se calcula con la ecuación:

$$\eta_e = \frac{Q_w}{EU(\text{ter} + \text{mec})} \quad (16)$$

Donde,  $Q_m$  es la energía para calentar el material (kJ),  $Q_w$  la energía para la evaporación de humedad (kJ),  $EU_{\text{mec}}$  es el consumo de energía mecánica (kJ) y  $EU_{\text{ter}}$  es el consumo de energía térmica. Se obtienen con las siguientes ecuaciones:

- **Energía para calentar el material ( $Q_m$ ):**

Para secadores convectivos y convectivos asistidos con IR:

$$Q_m = W_d \cdot c_m \cdot (T_{m2} - T_{m1}) \quad (17)$$

$$c_m = 1465,0 + 3560,0 \left( \frac{M_p}{1 + M_p} \right) \quad (18)$$

$$M_p = \left( \frac{W_w - W_d}{W_d} \right) \quad (19)$$

Donde  $W_d$  es el peso del material seco (kg),  $c_m$  es el calor específico del material (kJ/kg°C),  $T_{m2}$  es la temperatura de salida del material (K),  $T_{m1}$  es la temperatura de entrada del material (K),  $M_p$  es contenido de humedad de partícula en base seca (kg agua/ kg sólido) y  $W_w$  es el peso de la materia húmeda (kg).

- **Energía para la evaporación de humedad ( $Q_w$ ):**

$$Q_w = h_{fg} \cdot M_{w,ev} \quad (20)$$

Para la ecuación,  $h_{fg}$  es el calor latente de vaporización (kJ/kg) que se calcula con la ecuación 20 o 21 (Ec. 2 o Ec.3) de acuerdo a la temperatura de secado del proceso y  $M_{w,ev}$  es el peso del agua perdida (kg).

$$h_{fg} = 2,503 \times 10^6 - 2,386 \times 10^3 (T - 273,16) \quad (21)$$

$$273,16 \ll T(^{\circ}K) \ll 338,72$$

$$h_{fg} = (7,33 \times 10^{12} - 1,60 \times 10^7 \times T^2)^{0,5} \quad (22)$$

$$338,72 \ll T(^{\circ}K) \ll 533,16$$

- **Consumo de energía térmica ( $EU_{ter}$ ):**

*Secador de aire convectivo:*

$$EU_{ter} = (A \cdot v \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T) 3600 \quad (23)$$

$$\rho_a = \frac{101.325}{0.287 \cdot T} \quad (24)$$

$$C_a = 1009.26 - 0.0040403(T - 273.16) + 0.00061759(T - 273.16)^2 - 0.0000004097(T - 273.16)^3 \quad (25)$$

Donde el consumo de energía térmica se expresa en kJ, A es el área de trabajo (m<sup>2</sup>), v es la velocidad (m/s),  $\rho_a$  es la densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>),  $C_a$  el calor específico (kJ/kg°C),  $\Delta T$  la diferencia de temperatura (°C) y T es la temperatura (K). Esta ecuación (Ec.22) es la utilizada para el cálculo de los secados por Ventana de refractancia.

*Secador de aire convectivo asistido con IR:*

$$EU_{ter} = (A \cdot v \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T + K \cdot t)3600 \quad (26)$$

K es el poder de la lámpara (W) y t es el tiempo total de secado de cada muestra (h).

- **Consumo de energía mecánica ( $EU_{mec}$ ):**

*Secador de aire convectivo y secador aire convectivo asistido con IR:*

$$EU_{mec} = \Delta P \cdot M_{air} \cdot t \quad (27)$$

$EU_{mec}$  se expresa en kJ,  $\Delta P$  es la diferencia de presión (mbar) y  $M_{air}$  es el contenido de humedad del aire, t el tiempo de secado de cada muestra (h).

## 8. Color

El color de las muestras puede ser descrito al ser expresado en notaciones numéricas llamadas coordenadas de color CIE, el modelos de color L\*a\*b es un

estándar internacional para la medición de color desarrollada por la Commission Internationale d'Eclairage (CIE) en 1976, el color Lab tiene un componente de luminosidad (valor  $L^*$ , que tiene valores en un rango desde 0 a 100) y tiene dos componentes cromáticos: el componente  $a^*$  (desde el color verde hasta el rojo, con valores desde -120 a +120) y el componente  $b^*$  (desde el color azul hasta el amarillo, con valores desde -120 a +120) (Yam & Papadakis, 2004).

La obtención de los valores de los parámetros  $L^*a^*b^*$  no es dependiente de un instrumento de medición específicos, estos pueden obtenerse sin importar el instrumento utilizado, como cámara, scanner, monitor o impresora (Yam & Papadakis, 2004).

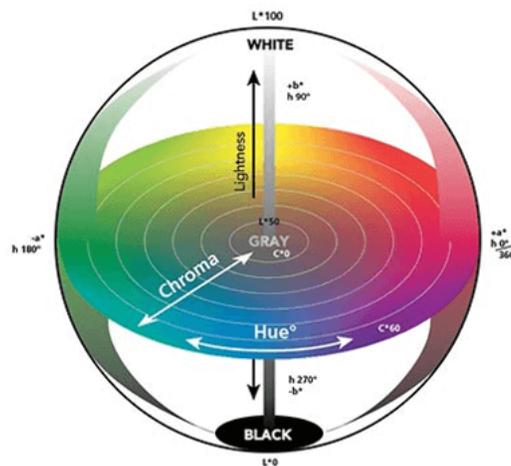


Figura 6: Representación de la descripción tridimensional de las coordenadas CIE Lab

### 8.1 Cambio de color ( $\Delta E$ )

El cambio de color total se calcula con los tres parámetros de color obtenidos, con la siguiente ecuación (Onwude et al., 2019):

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (28)$$

En donde  $L^*_0$ ,  $a^*_0$  y  $b^*_0$  corresponden a luminosidad, componente de color rojo-verde y componente de color azul-amarillo, respectivamente (Yam & Papadakis, 2004).

El  $\Delta E$  es un número que indica la magnitud de la diferencia de color entre dos muestras, no la dirección de esta diferencia, por lo que la CIE recomienda una fórmula de decisión de aceptación y rechazo del color, no solo con un  $\Delta E$ , sino que se utilice una fórmula  $\Delta E_{CMC}$ , que utiliza los números de  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C^*$  y  $\Delta H^\circ$  (Nielsen, 2010).

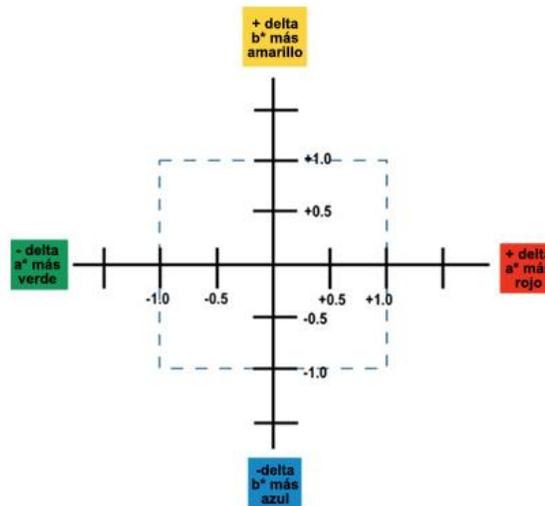


Figura 7: Representación de la diferencia de color en el plano de coordenadas de color

## 8.2 Valor Chroma ( $C^*$ )

El valor Chroma ( $C^*$ ) representa saturación de color de las muestras, este valor varía desde colores pálidos (valores bajos de  $C^*$ ) hasta colores vivos (valores altos de  $C^*$ ) (Vásquez-Parra et al., 2013). El valor Chroma se calcula con la ecuación (Vásquez-Parra et al., 2013):

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (29)$$

Para analizar el cambio de saturación entre las muestras secas y su condición inicial, se calcula la diferencia de Chroma ( $\Delta C^*$ ), con la ecuación (Vásquez-Parra et al., 2013):

$$\Delta C^* = C^* - C_0^* \quad (30)$$

En donde  $C_0^*$  se calcula con la ecuación 29 utilizando los parámetros iniciales de color  $a_0^*$  y  $b_0^*$  de la muestra fresca:

$$C_0^* = \sqrt{(a_0^*)^2 + (b_0^*)^2} \quad (31)$$

Un  $\Delta C^*$  ( $C^*_{muestras} - C^*_{estándar}$ ) de valor positivo significa que las muestras tienen una mayor intensidad o su color está más saturado, y un  $\Delta C^*$  de valor negativo significa que las muestras están menos saturadas (Nielsen, 2010).

### 8.3. Ángulo Hue ( $H^\circ$ )

El Hue es esta definido como el atributo de la sensación visual con el cual una área parece similar o uno de los colores percibidos: rojo, amarillo verde y azul, o a una combinación entre dos de ellos (Zheng et al., 2016). El Ángulo Hue ( $H^\circ$ , Hue Angle en inglés) es un parámetro utilizado para evaluar los parámetros de color expresado en grados, los ángulos 0 y 360° expresan el color rojo, mientras que de 90, 180 y 270° exhiben amarillo, verde y azul, respectivamente (Dehghannya et al., 2019).

El ángulo Hue ( $H^\circ$ ) se calcula con la ecuación (Avalos-Llano et al., 2018):

$$H^\circ = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (32)$$

Donde  $a^*$  y  $b^*$  son las coordenadas de color (Avalos-Llano et al., 2018). Para comparar el valor de  $H^\circ$  de las muestras secas con el valor de las muestras frescas se utilizó la siguiente ecuación (Nielsen, 2010):

$$\Delta H^\circ = H^\circ_{muestra} - H^\circ_{estándar} \quad (33)$$

En donde  $H^{\circ}_{\text{muestra}}$  es el valor del ángulo Hue calculado para las muestras secas y  $H^{\circ}_{\text{estándar}}$  es el valor de ángulo Hue del estándar con el cual se comparan las muestras, en este caso se comparará el  $H^{\circ}$  de las muestras secas con el valor de ángulo Hue de las muestras frescas.

Un  $\Delta H^{\circ}$  ( $H^{\circ}_{\text{muestra}} - H^{\circ}_{\text{estándar}}$ ) obtenido con un valor positivo significa que el ángulo hue se movió desde el valor estándar hasta el valor del ángulo de la muestra en un sentido de contrarreloj, por el contrario un valor negativo de  $\Delta H^{\circ}$  significa que el ángulo se movió en el sentido de más manillas del reloj, si el valor estándar o del ángulo hue es de  $90^{\circ}$ , un resultado de  $\Delta H^{\circ}$  positivo significa un cambio hacia la dirección del color, mientras que un resultado de  $\Delta H^{\circ}$  indica un cambio hacia la dirección del color rojo (Nielsen, 2010).

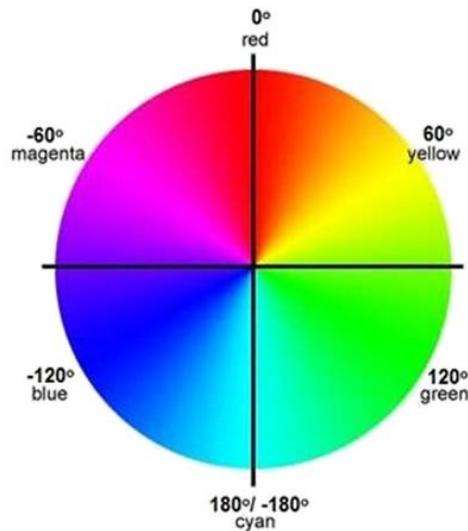


Figura 8: Representación bidimensional del ángulo Hue, indicando los colores básicos y su ángulo

#### 8.4. Índice de Pardeamiento (BI)

El índice de Pardeamiento (BI por sus iniciales en inglés Browning Index) es un parámetro que se representa solamente el color café de las muestras (Palou et al., 1999), debido a en las reacciones enzimáticas (reacción de Maillard y caramelización) se produce la formación de compuestos colorados amarillo –

dorado, producto de la reducción de azúcares, aminoácidos, proteínas a compuestos nitrogenados cuando estos son sometidos a procesos que involucran calor (Purlis & Salvadori, 2009). El BI se calcula con la siguiente ecuación:

$$BI = \frac{(x - 0,31)}{0,17} \quad (34)$$

Donde:

$$x = \frac{(a^* + 1,75L^*)}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)} \quad (35)$$

Los parámetros  $a^*$ ,  $b^*$  y  $L^*$  representan las coordenadas de color.

## 9. Calidad final de productos deshidratados

Para los alimentos es difícil acuñar una definición universal de calidad, debido a que se deben considerar varios factores complejos como físicos, composicionales y microbiológicos y se debe combinar la calidad nutricional y sensorial del alimento (Trimigno et al., 2015). Para frutas y verduras la calidad está constituida por una dinámica entre las propiedades fisicoquímicas inherentes de los productos y la percepción del producto, en donde se toma en cuenta las características organolépticas, aspectos funcionales y contenido de fitonutrientes del alimento (Kyriacou & Rouphael, 2018), con el proceso de secado los atributos de calidad pueden alterarse o degradarse, como el caso de los fitoquímicos que se degradan significativamente debido a su sensibilidad a las temperaturas (Devahastin & Niamnuy, 2010).

El color superficial es atributo de calidad sensorial importante, ya que este puede influenciar en las preferencias de los consumidores, es considerado como un indicador de madurez y deterioro en frutas y verduras y tiene la cualidad de que puede ser medido por técnicas sencillas y los parámetros obtenidos pueden ser relacionados con atributos de calidad (como el contenido de pigmentos del alimento) (Pathare et al., 2013).

El color en frutas y verduras es derivado de pigmentos naturales, los principales que otorgan un color característico a cada uno son la clorofila liposoluble (verde), los carotenoides (amarillo, naranja y rojo), las antocianinas hidrosolubles (rojo y azul), los flavonoides (amarillo) y las betalainas (rojo) (Pathare et al., 2013), el physalis es un fruto amarillo con un alto contenido de carotenoides, los que le conceden su color amarillo anaranjado característico, el cambio de color del puré durante los procesos de secado puede relacionarse con la degradación de los carotenoides presente, ya que su contenido disminuye con la exposición al calor del proceso.

Estudios declaran que el proceso de Ventana de Refractancia tiene buenos resultados en la calidad del producto cuando se utilizan altas temperaturas de agua (medio de calor) ya que con esto se obtiene un secado rápido y productos con baja temperatura, disminuyendo las reacciones de degradación, debido a que estas son dependientes del tiempo y la temperatura (Shende & Datta, 2019).

## **10. HIPOTESIS DEL TRABAJO**

El secado de puré de *Physalis peruviana* Linnaeus por método de Ventana de Refractancia tiene mayor eficiencia energética, eficiencia de secado y mejor retención de color superficial que los productos secados con los métodos de secado por aire caliente y secado por aire caliente asistido con radiación infrarroja.

## 11. OBJETIVOS

### 11.1. Objetivo general

Estudiar el método de secado de Ventana de Refractancia en puré de *Physalis peruviana* Linnaeus y compararlo con los métodos de secado de aire convectivo y aire convectivo asistido con infrarrojo en términos de la cinética de secado, eficiencia de secado y características del producto seco obtenido.

### 11.2. Objetivos específicos

- Secar puré de *Physalis peruviana* Linnaeus por los métodos de secado Ventana de Refractancia, secado por aire convectivo, secado por aire convectivo asistido con luz infrarroja y secado a presión subatmosférica, a tres temperaturas diferentes.
- Determinar la cinética de secado de los diferentes métodos.
- Modelar computacionalmente la cinética de secado de *Physalis peruviana* Linnaeus por los métodos de secado Ventana de Refractancia, secado por aire convectivo, secado por aire convectivo asistido con luz infrarroja y secado a presión subatmosférica.
- Determinar el efecto del secado en el color superficial del puré de Physalis, comparar los resultados en el producto fresco y el producto seco y entre productos secados por los diferentes métodos.

- Determinar las mejores condiciones para el secado de *P. peruviana* de métodos de secado de acuerdo con el que menor impacto en el parámetro físico color superficial y el tiempo de secado.

## 12. MATERIALES Y MÉTODOS (MATERIAS PRIMAS, REACTIVOS, EQUIPOS)

### 12.1 Materia Prima

La materia prima utilizada para este proyecto es el fruto de *Physalis* o goldenberry, el cual fue adquirido en la empresa Hortifrut.



*Figura 9: Imagen de un fruto de Physalis con su calix*

### 12.2. Preparación de las muestras

A los frutos frescos de *Physalis* se les extrajo su calix, se lavaron y seleccionaron, eliminando los frutos con hongos, luego fueron triturados para convertirlos en puré,

el cual fue dividido en bolsas de 250 g, luego se congelaron y almacenaron a una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Para su uso el puré se descongeló por 12 horas a una temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ . La Figura 10 presenta el diagrama de flujo del proceso de preparación de las muestras.

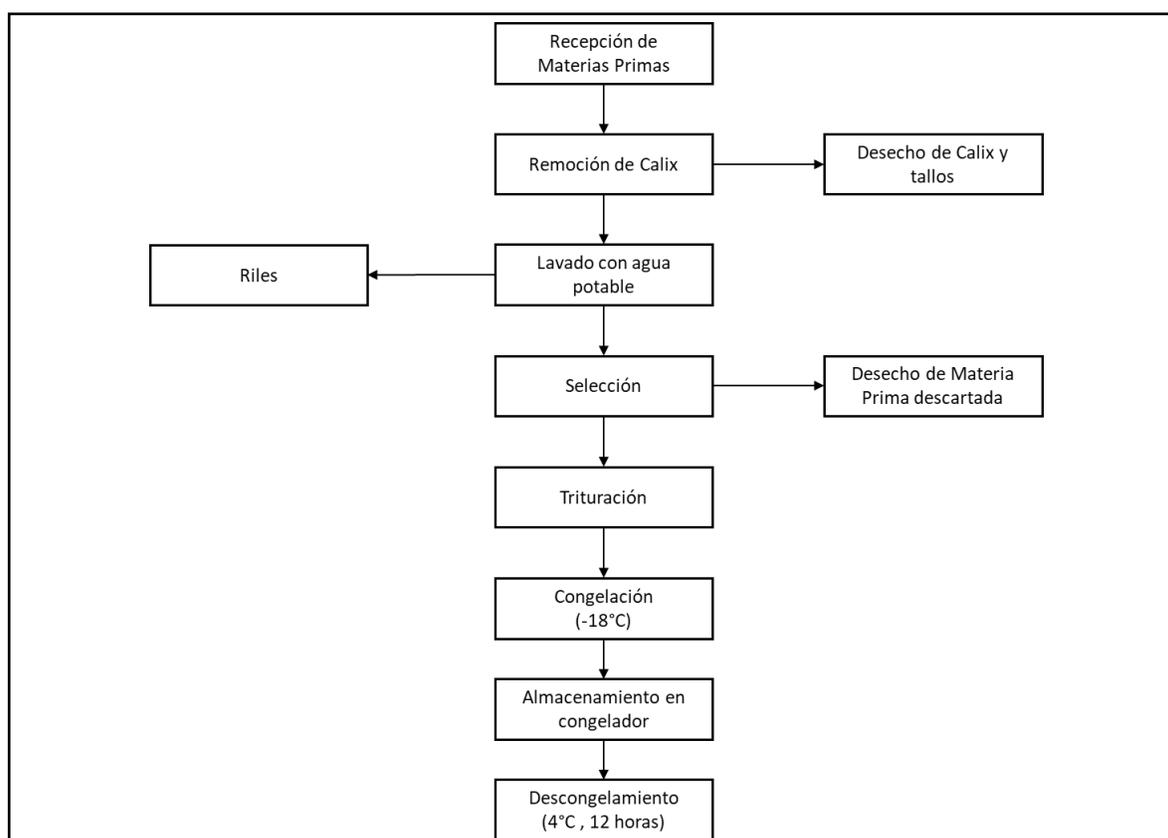


Figura 10: Diagrama de flujo de la preparación de las muestras

### 12.3 Procesos de secado

Los experimentos de secado fueron realizados por tres tipos técnicas diferentes: el secado por aire caliente (HAD), el secado por aire caliente asistido por luz infrarroja (IR) y secado de Ventana de Refractancia, este último se realizó en equipo de

escala piloto de laboratorio (LRW) y en equipo industrial (RW). Las temperaturas de secado fueron 50, 60 y 70°C y la intensidad de la luz infrarroja utilizada fue 250, 500 y 1000 Watts. Cada método de secado se realizó en triplicado. Antes de cada experimento se prendió los equipos y se esperó hasta alcanzar la temperatura seleccionada y obtener un estado estable. Tanto el secado por aire caliente, como el secado por aire caliente asistido por luz IR se realizaron en bandejas metálicas de 10 x 5 cm., el secado por Ventana de Refractancia a escala piloto se realizó en bandejas construidas con film de Mylar de 10 x 5 cm, en todos los métodos se utilizó un espesor de 3 mm, para los métodos de secado HAD, IR y LRW se tomó el peso de las muestras cada 15 minutos a los 50, 60 y 70°C y para el caso del secado IR a 70°C se tomó el peso cada 5 minutos. En el secado por Ventana de Refractancia las muestras fueron esparcidas en la cinta transportadora de Mylar con un espesor de 3 mm, se extrajeron muestras de aproximadamente 1 g. cada 15 minutos incluyendo una muestra en el tiempo cero, a las cuales se obtuvo su humedad.

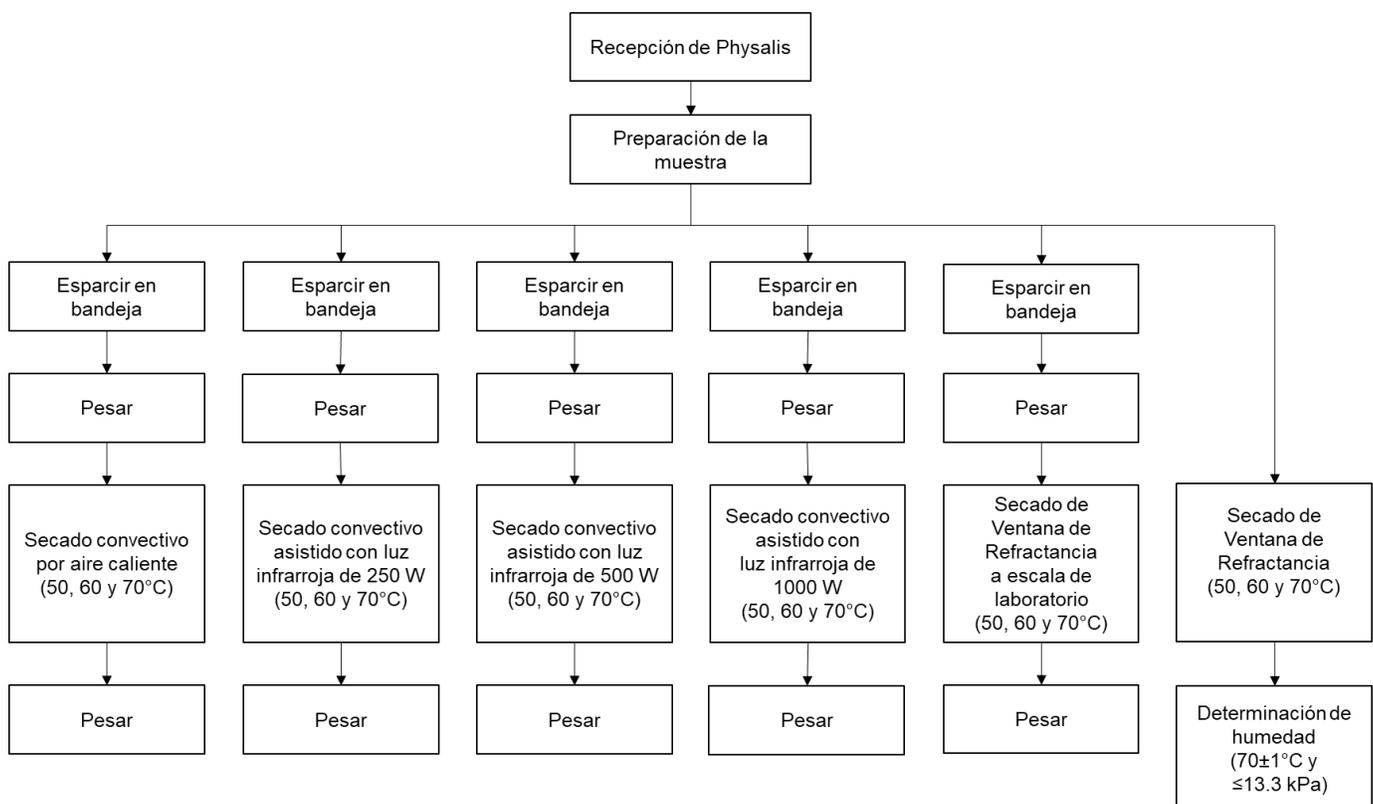


Figura 11: Diagrama de los procesos de secado de las muestras de *Physalis*

Tabla 1: Resumen de tratamientos de secado aplicados a puré de *Physalis* con los tipos de secado, temperatura de secado, intensidad de luz IR aplicada y la nomenclatura utilizada para identificar cada tratamiento de secado

Tipo Secado	Temperatura (°C)	Intensidad luz IR (Watts)	Nomenclatura
Aire convectivo	50	-	HAD50
	60	-	HAD60
	70	-	HAD70
Aire convectivo asistido con luz infrarroja	50	250	IR50l
	50	500	IR50m
	50	1000	IR50h
	60	250	IR60l
	60	500	IR60m
	60	1000	IR60h
	70	250	IR70l
	70	500	IR70m
	70	1000	IR70h
Ventana de Refractancia a escalada de laboratorio	50	-	LRW50
	60	-	LRW60
	70	-	LRW70
Ventana de Refractancia	50	-	RW50
	60	-	RW60
	70	-	RW70

### 12.3.1. Secador convectivo por aire caliente

El secador de aire convectivo consiste en un equipo con un ventilador y una batería de resistencias.

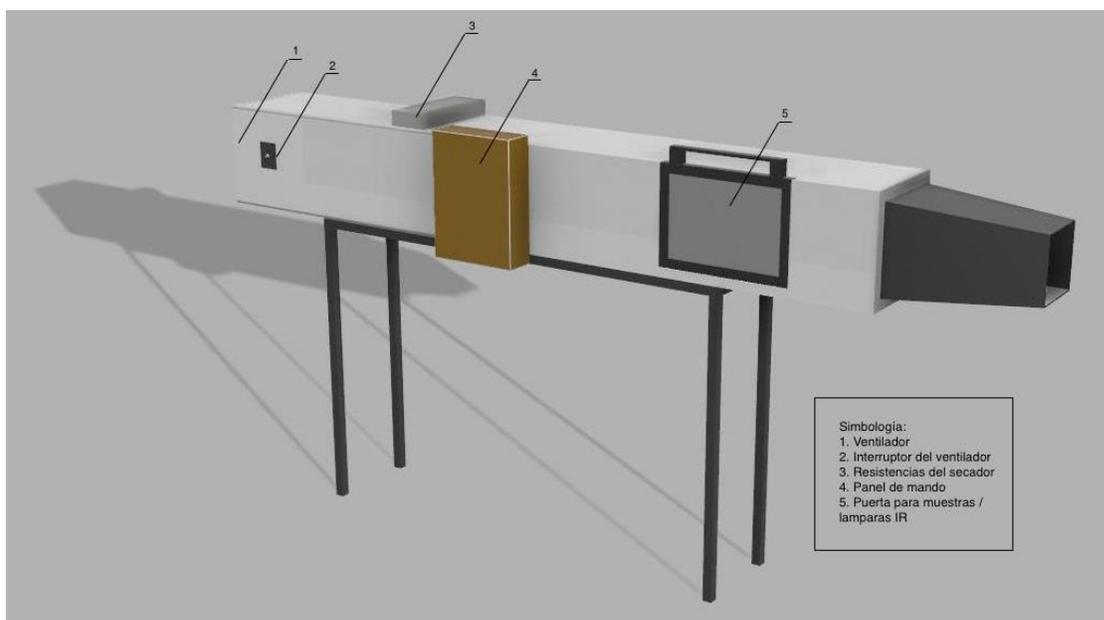


Figura 12: Ilustración del equipo de secado de aire convectivo y secado de aire convectivo asistido con luz infrarroja.

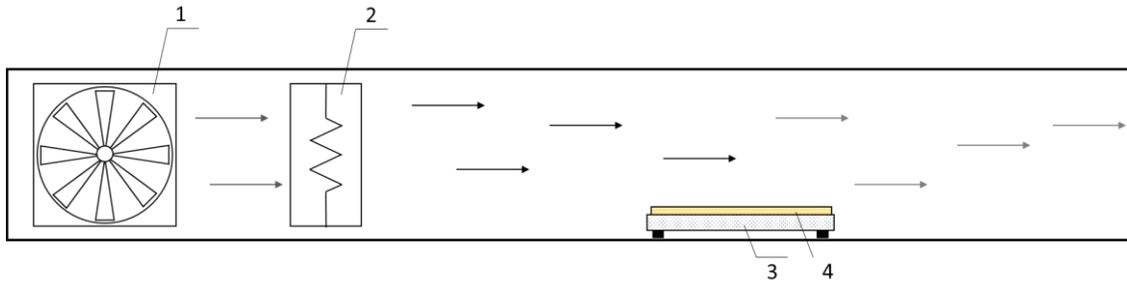


Figura 13: Esquema del interior del secador de aire convectivo, en donde 1 corresponde al ventilador, 2 es el banco de resistencias eléctricas, 3 es el sitio para colocar las muestras a secar y 4 es la muestra.

### 12.3.2. Secador convectivo asistido con luz infrarroja

El secador de aire convectivo consiste en un equipo con un ventilador, una batería de resistencias y una lámpara de luz infrarroja con una intensidad regulable de IR con un máximo de 1000 Watts, esta última está dispuesta sobre la zona para colocar las muestras.

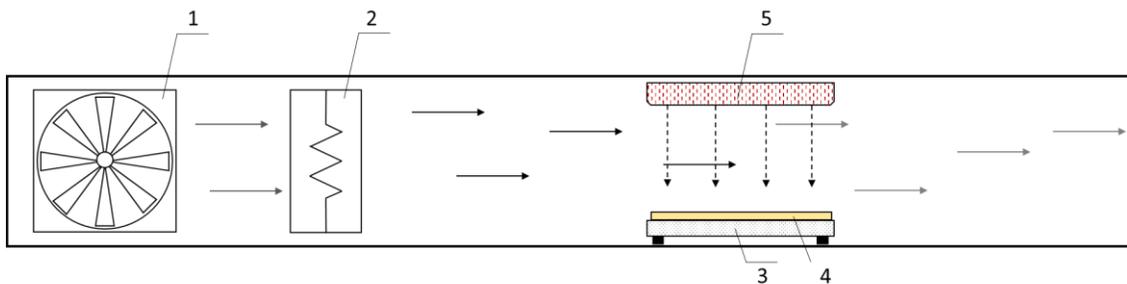


Figura 14: Diseño de secador de aire convectivo asistido con luz IR, en donde 1 corresponde al ventilador, 2 es el banco de resistencias eléctricas, 3 es el sitio para colocar las muestras a secar y 4 es la lámpara que emite radiación infrarroja.



Figura 15: Bandeja metálica con puré de *Physalis* descongelado

### 12.3.3 Secador por Ventana de Refractancia a escala de laboratorio

El secador de Ventana de Refractancia a escala de laboratorio consiste en utilizar un equipo de baño de agua termostático y film de plástico Mylar para situar sobre el agua caliente del equipo, en este caso se utilizó bandejas de 10 x 5 cm del material film Mylar.

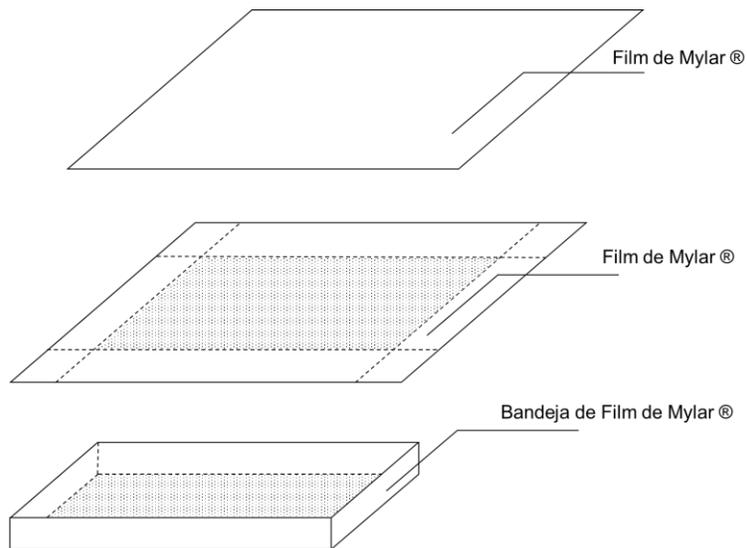


Figura 16: Esquema de la formación de las bandejas de film Mylar® para realizar el secado de Ventana de Refractancia a escala de laboratorio (LRW)

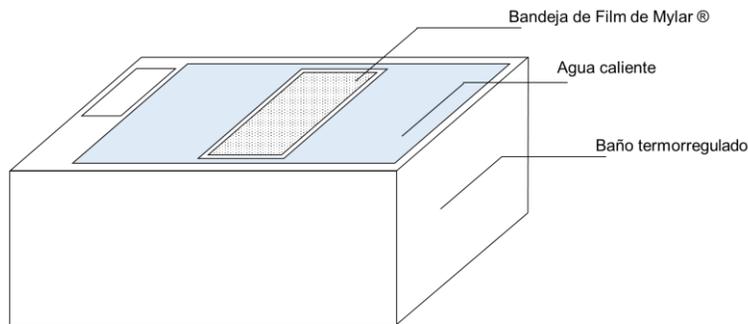


Figura 17: Representación del equipo de Ventana de Refractancia a escala de laboratorio

#### 12.3.4. Secador por Ventana de Refractancia de escala industrial

El secador de Ventana de Refractancia es un equipo que consiste en una cinta transportadora cuyo material es el film de plástico Mylar, bajo la cinta se sitúa un recipiente con agua caliente (la cual es recirculada por una bomba centrífuga desde un estanque de agua, en donde el agua es calentada por resistencias), y un recipiente de agua fría ( en donde se recircula agua fría desde por una bomba centrífuga desde un estanque, esta agua se utiliza para enfriar los productos y detener el proceso de secado). El equipo además cuenta con un sistema de extracción de aire húmedo sobre la cinta transportadora que cuenta con luz y un ventilador.

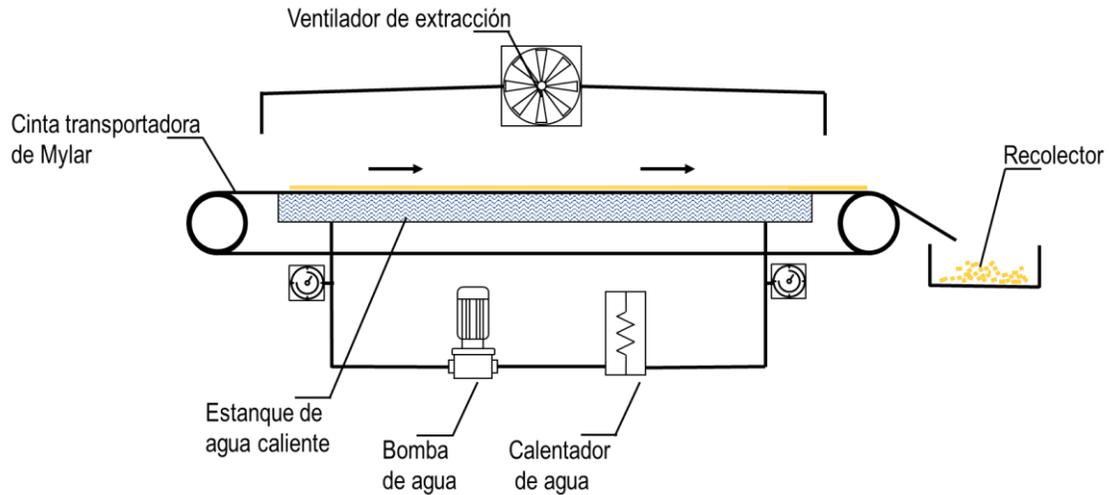


Figura 18: Esquema del secador de Ventana de Refractancia de escala industrial.

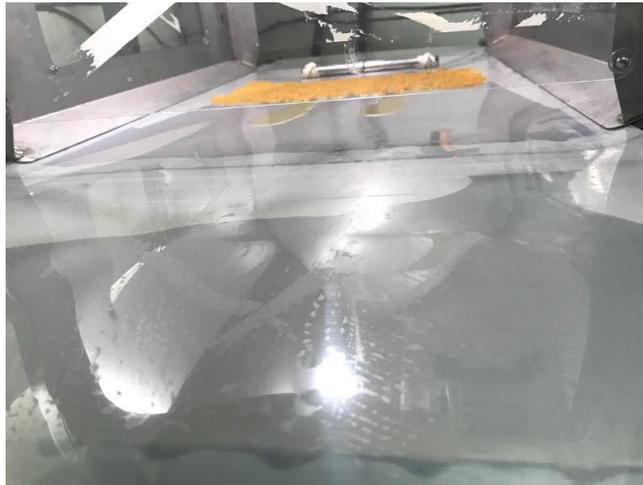


Figura 19: Imagen de la banda de Mylar® con puré de Physalis del equipo de Ventana de Refractancia de escala industrial

## 12.4. Humedad

### 12.4.1. Humedad inicial

Para obtener la humedad de las muestras iniciales se realizó el método en estufa a vacío de acuerdo a la metodología AOAC (AOAC, 2000), en donde se pesó 5 g. de

puré de Physalis descongelado en balanza analítica y se llevó a la estufa a vacío con  $70\pm 1^{\circ}\text{C}$  y una presión de  $\leq 13.3$  kPa por un tiempo de dos horas inicialmente, cumplido el tiempo se pesa la muestra en balanza analítica y se vuelve a llevar a la estufa hasta que la muestra alcance un peso constante, se medita el peso cada 30 minutos hasta que la muestra alcance esta condición. El análisis se realizó en triplicado.

#### **12.4.2 Humedad de las muestras tratadas en el equipo de Ventana de Refractancia de escala industrial**

En este método de secado se obtuvo la humedad inicial y la humedad del producto durante el proceso de secado, cada 30 minutos se sacó muestras de aproximadamente 1 gramo de la cinta transportadora de diferentes puntos, y se obtuvo su humedad de acuerdo con el método en estufa a vacío según la metodología AOAC (AOAC, 2000).

#### **12.5. Curva de secado**

Para el estudio de la cinética durante los procesos de secado realizados se construyó curvas de secado de MR versus tiempo, donde el MR se calculó con la Ec. 3, con la información obtenida de la humedad de las muestras en el tiempo del secado.

#### **12.6. Modelamiento matemático de la curva de secado**

Para modelar los procesos de secado se utilizaron los 5 modelos matemáticos, los que son utilizados en el ajuste de curvas de secado realizado en capa fina, estos modelos son los de Newton, Henderson y Pabis, Page, Page modificado y Weibull, sus ecuaciones matemáticas son:

Tabla 2: Resumen de los modelos matemáticos utilizados en el secado de muestras de puré de Physalis.

Nombre del modelo	Ecuación	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$ (8)	(Salehi & Kashaninejad, 2018)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$ (9)	(Zhang et al., 2016)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$ (10)	(Zhang et al., 2016)
Page modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$ (11)	(Zhang et al., 2016)
Weibull	$MR = \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right]$ (12)	(Corzo et al., 2008)

El ajuste de los modelos obtenidos de los métodos de secado utilizado para el puré de Physalis se analizó con el cálculo de los parámetros,  $X^2$  y SEE, calculados con las ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

### 12.7 Eficiencia de secado y eficiencia energética

La eficiencia de secado (DE, drying efficiency) de los experimentos de secado se calculó con la ecuación 15, con la cual se obtiene el valor en porcentaje de la razón entre la energía utilizada para calentar las muestras (para evaporar la humedad de ellas) y el consumo total de energía del proceso, para lo cual también se calculó la energía para calentar el material ( $Q_m$ ) con la ecuación 16, la energía para la evaporación de humedad ( $Q_w$ ) con la ecuación 19, el consumo de energía térmica ( $EU_{ter}$ ) con la ecuación 20 para el secado por aire convectivo; secado por Ventana de Refractancia en equipo de laboratorios y secado por Ventana de Refractación, y con la ecuación 23 para el secado por aire convectivo asistido con luz infrarroja, y también, se calculó el consumo de energía mecánica ( $EU_{mec}$ ) con la ecuación 24.

Con los mismos parámetros ( $Q_m$ ,  $Q_w$  ( $EU_{ter}$   $EU_{mec}$ ), se calcula la eficiencia energética de los procesos con la ecuación 16.

## 12.8. Medición de color

Para determinar el color de los productos deshidratados y durante el deshidratado de Ventana de Refractancia, se tomó una fotografía de las muestras con cámara fotográfica, en una zona con iluminación uniforme, las imágenes obtenidas fueron analizadas cuantitativamente en el software Adobe Photoshop 2019, programa utilizado principalmente para la edición de imágenes, en este caso se utilizó su herramienta de análisis de color para obtener los valores de los parámetros  $L^*a^*b^*$  de 5 puntos distintos de las muestras analizadas. Con los valores  $L^*a^*b^*$  se calculó el cambio de color, valor chroma, el ángulo Hue de las muestras y el índice de pardeamiento de las muestras.

## 12.9. Imagen térmica

Se utilizó una cámara térmica HT-04D, las imágenes se tomaron desde una vista superior en las muestras secadas en el equipo de Ventana de Refractancia de laboratorio.

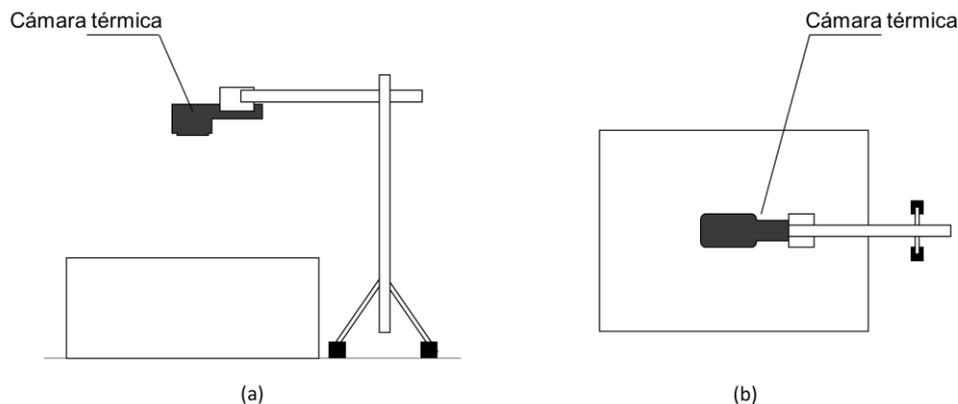


Figura 20: Método de la toma de imágenes térmicas, (a) vista frontal y (b) vista superior



*Figura 21: Imagen del equipo de Ventana de Refractancia a escala de laboratorio con la cámara infrarroja instalada*

### **12.10. Análisis estadístico**

Para analizar los resultados se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en el programa Statgraphics® Centurion XVI. Las diferencias entre las medias se analizaron usando las diferencias menos significativas (LSD) con un nivel de significancia de  $\alpha=0,05$  y un intervalo de confianza del 95%. Además, se analizó la existencia de grupos homogéneos por el test de rango múltiple para cada parámetro.

### **13. RESULTADO Y DISCUSIÓN**

### 13.1. Cinética de secado

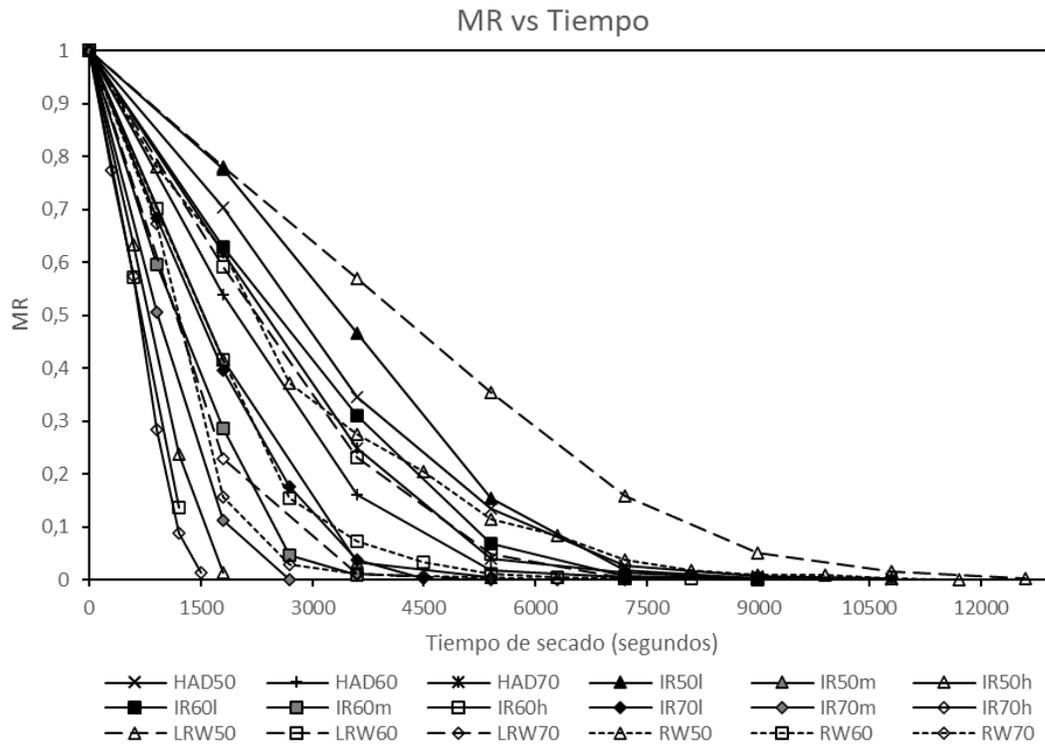


Figura 22: Curva de secado de los procesos de recado realizados en las muestras de puré de *Physalis*

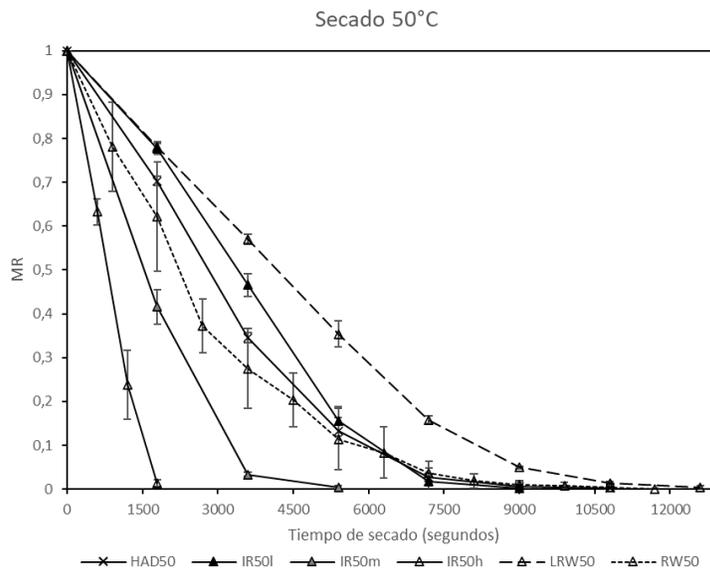


Figura 23: Curvas de secado de los procesos con temperatura de 50°C

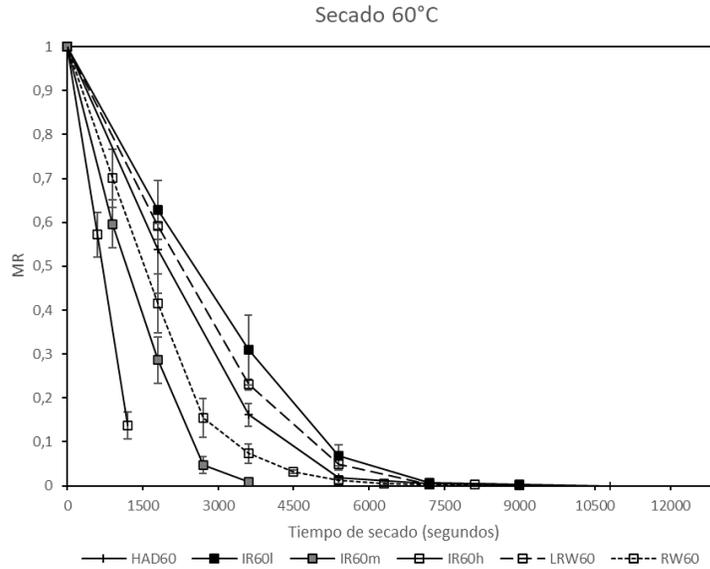


Figura 24: Curvas de secado de los procesos con temperatura de 60°C

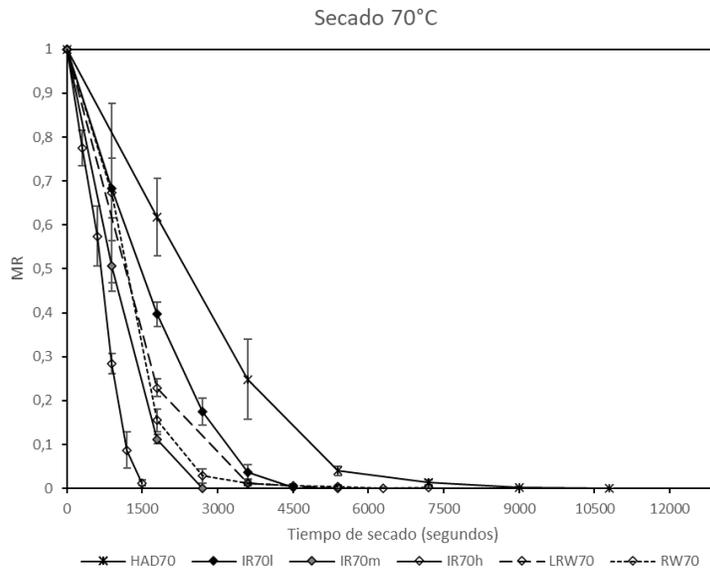


Figura 25: Curvas de secado de los procesos con temperatura de 70°C

Las curvas construidas con la información obtenida de los distintos procesos de secado tienen una forma de curva convexa y decreciente, similares a las curvas típicas descritas para el proceso de secado de alimentos como en la Figura 5 , en todas las curvas es posible identificas la fase de calentamiento, fase de velocidad constante y la fase de velocidad decreciente, con excepción de las curvas del

secado de aire convectivo asistido con luz IR alta de 1000 Watts (IR50h, IR60h y IR70h), ya que no el proceso fue interrumpido antes de que las el proceso pudiera alcanzar la región de velocidad de secado decreciente debido a los efectos negativos en las muestras causados por la temperatura y la luz IR en las muestras.

Se puede distinguir en su mayoría la fase de velocidad constante como la fase predominante en todos los procesos de secado, por lo que el mecanismo de transferencia de masa dominantes en el proceso son la evaporación desde la superficie de las muestras y la difusión en su interior (Kerr, 2019) (Berk, 2018a).

También se puede observar la disminución exponencial del contenido de humedad (medido en MR) con el paso del tiempo, es posible identificar una disminución más notoria del contenido de humedad con el aumento de temperatura y con el aumento de la intensidad de luz IR aplicada. El efecto producido por la temperatura del aire se debe a que mayores temperaturas producen mayor evaporación de agua desde la capa de humedad en la superficie (Lopez et al., 2013) y el efecto producido por la luz IR se atribuye a que el aumento de la intensidad IR resulta en una mayor transferencia de masa, mayor temperatura de las muestras y pérdida de agua excesiva (Doymaz, 2015).

De los métodos estudiados, el secado por ventana de Refractancia de escala de laboratorio a 50° C (LRW50) fue con el que se requirió un tiempo mayor para realizar el secado de las muestras (280 min). De las muestras de puré de *Physalis*, y el secado convectivo por aire asistido con luz IR de 70° C y 1000 Watts de intensidad (IR70h) fue el método que requirió un menor tiempo (30 min), para un mismo método de secado el tiempo de secado disminuye con el aumento de temperatura y en los métodos convectivos asistidos con luz infrarroja, el tiempo disminuye con la aplicación de luz IR y a su vez disminuye con el aumento de la intensidad de esta, esto ocurre generalmente porque en el medio existen mayores fuerzas de secado por la transferencia de calor (debido a la mayor diferencia de temperatura) y por la transferencia de masa (debido a una mayor diferencia en la humedad relativa).(Zhang et al., 2016).

Entre los métodos de secado estudiados, los correspondientes a aire convectivo asistido con luz infrarroja de alta intensidad (1000 Watts) son los que necesitan menor tiempo para lograr los secados, esto puede ser debido al calentamiento de las muestras por dos fuentes de calor, siendo el IR de alta intensidad (1000 Watts) el que menores tiempos de secado requiere (40, 30 y 30 minutos respectivamente a 50, 60 y 70°C con 1000 Watts de IR), pero que a su vez causa mayores efectos negativos en las muestras, como el color superficial de estas que presenta notorios efectos adversos, como la obtención de una apariencia “tostada” con tonos naranja cafésoso y hasta zonas de color negras.

El tiempo de secado del secado de Ventana de Refractancia disminuye con el aumento de temperatura, y muestra similitudes con los tiempos del secado de aire convectivo asistido con luz infrarroja de 250 y 500 W (IR60I, IR60m, IR70I) y es menor que los tiempos requeridos por los secados por aire convectivo, al ser comparados en la misma temperatura.

### 13.2. Difusividad ( $D_{eff}$ )

Tabla 3: Valores de difusividad ( $m^2/s$ )  $\times 10^{-8}$  de secado de puré de *Physalis* con diferentes métodos de secado y temperaturas. Letras minúsculas denotan grupos homogéneos de acuerdo con el método de secado.

$D_{eff}$ ( $m^2s^{-1}$ )			
Tipo de secado	Temperatura ( $^{\circ}C$ )		
	50	60	70
Convectivo (HAD)	5,841 $\pm$ 0,508 <sup>a,b</sup>	6,514 $\pm$ 0,198 <sup>a,b,c</sup>	6,643 $\pm$ 0,289 <sup>b,c</sup>
Convectivo + IR 250w	6,054 $\pm$ 0,554 <sup>a,b,c</sup>	6,719 $\pm$ 0,632 <sup>b,c</sup>	11,75 $\pm$ 0,857 <sup>e,f</sup>
Convectivo + IR 500w	10,36 $\pm$ 1,648 <sup>e,f</sup>	12,51 $\pm$ 0,933 <sup>f</sup>	11,1 $\pm$ 0,487 <sup>e,f</sup>
Convectivo + IR 1000w	21,45 $\pm$ 2,586 <sup>h</sup>	15,2 $\pm$ 1,625 <sup>g</sup>	26,13 $\pm$ 3,728 <sup>i</sup>
Ventana de Refractancia (escala laboratorio LRW)	4,274 $\pm$ 0,618 <sup>a</sup>	7,183 $\pm$ 0,448 <sup>b,c</sup>	11,33 $\pm$ 0,313 <sup>e,f</sup>
Ventana de Refractancia (RW)	5,447 $\pm$ 0,7800 <sup>a,b</sup>	7,973 $\pm$ 1,641 <sup>c,d</sup>	9,718 $\pm$ 1,348 <sup>d,e</sup>

Los resultados de  $D_{eff}$  calculados muestran que los valores obtenidos se encuentran entre el rango de  $5,841 \times 10^{-8}$  a  $6,643 \times 10^{-8} m^2s^{-1}$  para los valores de secado HAD, de  $6,054 \times 10^{-8}$  a  $26,13 \times 10^{-8} m^2s^{-1}$  para secado IR, de  $4,274 \times 10^{-8}$  a  $11,33 \times 10^{-8} m^2s^{-1}$  para LRW en un rango desde  $4,274 \times 10^{-8}$  a  $11,33 \times 10^{-8} m^2s^{-1}$  y un rango entre  $5,447 \times 10^{-8}$  a  $9,718 \times 10^{-8} m^2s^{-1}$  para el secado RW, como se puede ver en la tabla 3, estos valores obtenidos pueden considerarse como valores de  $D_{eff}$  altos, comparados con valores reportados en la literatura, debido a que los valores para alimentos se encuentran en un rango general estándar entre  $10^{-10}$  y  $10^{-9} m^2s^{-1}$  (Sadeghi et al., 2019) y para el secado de *Physalis* son los métodos aplicados, los valores de  $D_{eff}$  se encuentran en el rango de  $10^{-8}$  y  $10^{-7} m^2s^{-1}$ . Estos altos valores pueden ser

resultado del proceso de trituración en el pretratamiento de las muestras, al secar el puré obtenido de la trituración de la fruta se rompe su estado sólido y la transferencia de masa no se produce por poros, en los alimentos sólidos el transporte de agua ocurre a través de los medios porosos de su interior (espacios vacíos rellenos de gas o líquido), estos con el proceso de secado sufren deformaciones o encogimiento, lo cual tiene influencia en la velocidad de transporte (Sabarez, 2015), ya que el puré no es un sólido poroso, la difusión de la transferencia de masa puede ser mayor.

El método de secado de aire convectivo asistido con luz IR de 1000 Watts a 70°C (IR70h) es el método con un valor de  $D_{\text{eff}}$  más alto de  $26,13 \times 10^{-8}$ , obtenido por la alta temperatura (70°C) y alta IR (1000 Watts), mientras que el secado de LRW50 es el método con un menor valor de difusividad,  $4,27 \times 10^{-8}$ , debido a la baja temperatura utilizada (50°C). Estos valores muestran la tendencia a que la difusión aumenta con el aumento de temperatura y que métodos combinados que tienen más de un medio de calentamiento, como en este caso con el aire caliente y la luz infrarroja, tiene un efecto sinérgico, logrando mejores resultados que con solo un medio. En general, se puede observar que los métodos que involucran la radiación como medio de transporte de energía tienen un efecto positivo en la difusión del método, logrando altos valores de  $D_{\text{eff}}$ .

De los resultados de  $D_{\text{eff}}$  se puede observar que en un mismo tipo de secado el coeficiente aumento de valor con el aumento de la temperatura y en el caso de los secados asistidos con luz infrarroja se puede ver que para una misma temperatura, pero diferente intensidad de luz infrarroja aplicada, el valor de  $D_{\text{eff}}$  aumenta con la intensidad IR. El aumento de  $D_{\text{eff}}$  debido al aumento de la intensidad de radiación IR puede ocurrir debido a que la luz IR produce que las muestras absorban más energía en sus superficie, evaporando humedad, provocando un gradiente de temperatura interna lo que aumenta la presión de vapor y produce el aumento de poros en las muestras (Sadeghi et al., 2019), y que en conjunto con las consecuencias del aumento en la actividad de las moléculas de agua (Torki-

Harchegani et al., 2017) provocado por la luz IR, producen que la difusión de agua hacia la superficie sea más rápida y  $D_{\text{eff}}$  tenga valores más altos.

La tendencia de aumento de  $D_{\text{eff}}$  con el aumento de la temperatura del medio no ocurre para los secados con aire convectivo asistidos con luz infrarroja de intensidad de 500 y 1000 Watts (IRm y IRh), ya que no existe una proporción directa entre temperatura y  $D_{\text{eff}}$  calculado, lo cual puede haber resultado de la alta transferencia de masa en su superficie que además de ser calentada por altas temperaturas recibe altas intensidades de luz IR, produciendo que la difusión no siga una tendencia lineal con la relación temperatura-IR aplicado a las muestras.

De acuerdo con el estudio estadístico realizado para comparar los resultados de  $D_{\text{eff}}$  obtenido de el secado de Ventana de Refractancia con los otros métodos, se obtiene que este método presenta diferencias significativas entre los valores de  $D_{\text{eff}}$  obtenido entre las temperaturas de 50 y 60°C del método, y RW presenta diferencias con los resultados con los resultados de secado convectivo asistido con IR de 1000 Watts, ya que estos se encuentran en diferentes grupos homogéneos. Debido a que no pertenecen a un mismo grupo homogéneo, RW50 tiene diferencias significativas con IR50m y IR50h, RW60 tiene con IR60m y IR60h y RW70 tiene diferencias significativas con HAD70 y IR70h. Podemos decir que para el secado de Ventana de Refractancia el aumento de la temperatura de secado en 10°C produce un aumento significativo en el valor de  $D_{\text{eff}}$  del proceso y que los valores de  $D_{\text{eff}}$  de estos métodos son estadísticamente diferentes de los valores de los secados de aire convectivo asistido con luz IR de 500 y 1000 Watts.

Al comparar los métodos de Ventana de Refractancia y de Ventana de Refractancia en escala de laboratorio se obtiene que al realizar el secado a una misma temperatura el  $D_{\text{eff}}$  no tiene diferencias significativas y los resultados son similares entre ellos, presentando casi los mismos grupos homogéneos con los otros métodos, esto indica que el valor de  $D_{\text{eff}}$  no es afectado por la escala del equipo

utilizado, ya que las condiciones en ambas son las mismas (se utilizó el mismo film de Myar®, espesor de film y espesor de muestras).

En cuanto al estudio estadístico de los valores de  $D_{eff}$  de todos los métodos de secados se puede decir que el método de aire convectivo asistido con luz infrarroja de 1000 Watts es el método que no está en ningún grupo homogéneo con otro método ni entre ellos en la misma temperatura, por lo cual sus  $D_{eff}$  presenta diferencias significativas con todos los otros métodos de secado, hay que mencionar que además son los valores con mayor valor de  $D_{eff}$  obtenidos.

### **13.3 Energía de activación**

La energía de activación ( $E_a$ ) para los tipos de secado estudiados en puré de Physalis están en el rango desde 4,107 hasta 45,267  $\text{kJmol}^{-1}$ , valores que corresponden al secado IRm y LRW respectivamente, mostrando que el método de secado por aire convectivo con luz infrarroja de 500 Watts como el método menos sensible a la temperatura de proceso y al método de secado por Ventana de Refractancia en equipo de escala de laboratorio como el más sensible a la temperatura.

En alimentos, la energía de activación calculada por lo general se encuentra en el rango de 12-130  $\text{kJ/mol}$  según el autor Sadeghi (Sadeghi et al., 2019) pero también de ha se ha determinado valores de  $E_a$  entre 15-40  $\text{kJ/mol}$  como el rango en donde se han reportado generalmente los resultados de energía de activación calculados para varios alimentos (Zhang et al., 2016), los resultados de los métodos de HAD, IRm, LRW y RW se encuentran entre estos rangos, pero no los valores de IRm y IRh, con resultados por debajo del rango, mostrándolos como métodos poco sensibles a la temperatura, lo cual se debe a que al aplicar o incrementar la intensidad de radiación infrarroja, la temperatura aumenta, aumenta la energía para el proceso y por ende la energía de activación para la difusión es menor (Sadeghi et al., 2019).

Al comparar los resultados entre métodos de secado, se puede observar que en comparación con HAD, todos los métodos (con excepción de LRW) tienen menores valores de  $E_a$  y con ellos es posible iniciar la difusión con menos energía, esto puede ocurrir debido a que en ellos ocurre transferencia de calor por radiación, lo que resulta en mayor energía en la materia desde fases iniciales de proceso (Sadeghi et al., 2019).

Tabla 4: Energía de activación (kJ/mol) y  $D_0$  ( $m^2/s$ ) de los métodos de secado

Ea y $D_0$		
Método	$D_0$	Ea
HAD	$2,581 \times 10^{-6}$	37,333
IR I	$1,637 \times 10^{-2}$	30,414
IR m	$1,548 \times 10^{-6}$	4,107
IR h	$3,199 \times 10^{-5}$	10,821
LRW	3,249	45,267
RW	$7,802 \times 10^{-2}$	26,792

Las ecuaciones de  $D_{eff}$  y de Fick obtenidas con los resultados de  $E_a$  y  $D_0$  calculados para cada método de secado son las siguientes:

HAD:

$$D_{eff} = 2,581 \times 10^{-6} e^{\left(\frac{-37333,121}{RT}\right)}$$

$$x_t = \left[ \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{2,581 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-37333,121}{RT}\right) \times \pi^2 \times t}{4L^2}\right) \right] \times (x_0 - x_e) + x_e$$

HAD+IR I:

$$D_{eff} = 1,637 \times 10^{-2} e^{\left(\frac{-30414,131}{RT}\right)}$$

$$x_t = \left[ \frac{8}{\pi^2} \exp \left( \frac{1,637 \times 10^{-2} \exp \left( \frac{-30414,131}{RT} \right) \times \pi^2 \times t}{4L^2} \right) \right] \times (x_0 - x_e) + x_e$$

HAD+IR m:

$$D_{eff} = 1,548 \times 10^{-6} e^{\left( \frac{-4107,230}{RT} \right)}$$

$$x_t = \left[ \frac{8}{\pi^2} \exp \left( \frac{1,548 \times 10^{-6} \exp \left( \frac{-4107,230}{RT} \right) \times \pi^2 \times t}{4L^2} \right) \right] \times (x_0 - x_e) + x_e$$

HAD+IR h:

$$D_{eff} = 3,199 \times 10^{-5} e^{\left( \frac{-10821,546}{RT} \right)}$$

$$x_t = \left[ \frac{8}{\pi^2} \exp \left( \frac{3,199 \times 10^{-5} \exp \left( \frac{-10821,546}{RT} \right) \times \pi^2 \times t}{4L^2} \right) \right] \times (x_0 - x_e) + x_e$$

LRW:

$$D_{eff} = 3,249 e^{\left( \frac{-45267,406}{RT} \right)}$$

$$x_t = \left[ \frac{8}{\pi^2} \exp \left( \frac{3,249 \exp \left( \frac{-45267,406}{RT} \right) \times \pi^2 \times t}{4L^2} \right) \right] \times (x_0 - x_e) + x_e$$

RW:

$$D_{eff} = 7,802 \times 10^{-2} e^{\left( \frac{-26792,929}{RT} \right)}$$

$$x_t = \left[ \frac{8}{\pi^2} \exp \left( \frac{7,802 \times 10^{-2} \exp \left( \frac{-26792,929}{RT} \right) \times \pi^2 \times t}{4L^2} \right) \right] \times (x_0 - x_e) + x_e$$

### 13.4 Modelamiento matemático

Tabla 5: Parámetros empíricos de los modelos matemáticos utilizados en la simulación de la curva de secado de los diferentes métodos de secado para el puré de Physalis

Secado	Coeficientes				
	Modelo matemático				
	NEWTON	HERNDERSON AND PABIN	PAGE	PAGE MODIFICADO	WEIBULL
HAD50	k: 0,0005±0,0	k: 0,0006±0,0001 a: 1,8498±0,2152	n: 1,6499±0,1029 k: 1,8345x10 <sup>-7</sup> ± 1,4350x10 <sup>-6</sup>	n: 1,6499±0,1029 k: 0,0003± 3,7844x10 <sup>-6</sup>	β: 1,6499±0,1029 α: 3420,8680± 44,5572
HAD60	k: 0,0027±0,0035	k: 0,0007±0,0 a: 1,4136±0,1722	n: 1,9398±0,1672 k: 4,5526x10 <sup>-7</sup> ± 5,2884x10 <sup>-7</sup>	n: 1,9398±0,1672 k: 0,0004± 3,6906x10 <sup>-5</sup>	β: 1,9398±0,1672 α: 2557,7512± 237,7586
HAD70	k: 0,0006±0,0	k: 0,0007±0,0 a: 1,7653±0,2368	n: 1,5891±0,1345 k: 4,8823x10 <sup>-6</sup> ± 3,9123x10 <sup>-6</sup>	n: 1,5891±0,1345 k: 0,0004± 4,6486x10 <sup>-5</sup>	β: 1,5891±0,1345 α: 2829,5290± 394,6218
IR50I	k: 0,0005±0,0001	k: 0,0007±0,0001 a: 2,3395±0,1345	n: 2,0034±0,0575 k: 7,7169x10 <sup>-8</sup> ± 5,0656x10 <sup>-8</sup>	n: 2,0034±0,0575 k: 0,0003± 1,7402x10 <sup>-5</sup>	β: 2,0034±0,0575 α: 3787,7570± 239,8784
IR50m	k: 0,0010±0,0001	k: 0,0011±0,0002 a: 1,3267±0,3240	n: 1,7603±0,1597 k: 2,4830x10 <sup>-6</sup> ± 1,8581x10 <sup>-6</sup>	n: 1,7603±0,1597 k: 0,0005± 3,0184x10 <sup>-5</sup>	β: 1,7603±0,1597 α: 1899,2410± 105,8261
IR50h	k: 0,0020±0,0002	k: 0,0024±0,0003 a: 1,7307±0,2092	n: 2,0098±0,2020 k: 1,9655x10 <sup>-6</sup> ± 2,2430x10 <sup>-6</sup>	n: 2,0098±0,2020 k: 0,0011± 4,3553x10 <sup>-5</sup>	β: 2,0098±0,2020 α: 915,4428± 37,0510
IR60I	k: 0,0006±0,0	k: 0,0007±0,0001 a: 2,0683±0,3893	n: 1,6835±0,1301 k: 2,0237x10 <sup>-6</sup> ± 1,4850x10 <sup>-6</sup>	n: 1,6835±0,1301 k: 0,0003± 3,3324x10 <sup>-5</sup>	β: 1,6835±0,1301 α: 2977,5752± 305,8050
IR60m	k: 0,0012±0,0001	k: 0,0014±0,0001 a: 1,6728±0,0390	n: 1,6459±0,0758 k: 7,6012x10 <sup>-6</sup> ± 4,6011x10 <sup>-6</sup>	n: 1,6459±0,0758 k: 0,0007± 6,5480x10 <sup>-5</sup>	β: 1,6459±0,0758 α: 1410,0534± 129,5188
IR60h	k: 0,0015±0,0002	k: 0,0017±0,0002 a: 1,1583±0,0470	n: 1,8408±0,2542 k: 8,0634x10 <sup>-6</sup> ± 6,5731x10 <sup>-6</sup>	n: 1,8408±0,2542 k: 0,0012± 7,5630x10 <sup>-5</sup>	β: 1,8408±0,2542 α: 824,5969± 49,5417
IR70I	k: 0,0010±0,0001	k: 0,0013±0,0001 a: 2,2391±0,2581	n: 1,6956±0,1493 k: 5,3632x10 <sup>-6</sup> ± 6,4488x10 <sup>-6</sup>	n: 1,6956±0,1493 k: 0,0006± 4,6840x10 <sup>-5</sup>	β: 1,6956±0,1493 α: 1737,6218± 136,4830
IR70m	k: 0,0011±0,0	k: 0,0012±0,0001 a: 1,1475±0,0537	n: 1,6903±0,2772 k: 2,1142x10 <sup>-5</sup> ± 3,0552x10 <sup>-5</sup>	n: 1,6903±0,2772 k: 0,0009± 5,5243x10 <sup>-5</sup>	β: 1,6903±0,2772 α: 1126,2491± 71,1732
IR70h	k: 0,0023±0,0003	k: 0,0029±0,0004 a: 1,8851±0,2460	n: 1,7817±0,0846 k: 8,8958x10 <sup>-6</sup> ± 5,1343x10 <sup>-6</sup>	n: 1,7817±0,0846 k: 0,0014± 5,1309x10 <sup>-5</sup>	β: 1,7817±0,0846 α: 725,1394± 26,4223
LRW50	k: 0,0004±0,0001	k: 0,0005±0,0001 a: 2,3076±0,4453	n: 1,6505±0,0426 k: 9,0388x10 <sup>-7</sup> ± 3,0582x10 <sup>-7</sup>	n: 1,6505±0,0426 k: 0,0002± 1,0578x10 <sup>-5</sup>	β: 1,6505±0,0426 α: 4699,7239± 236,5249
LRW60	k: 0,0007±0,0	k: 0,0008±0,0 a: 1,9398±0,0992	n: 1,7082±0,0391 k: 1,3978x10 <sup>-6</sup> ± 4,1030x10 <sup>-7</sup>	n: 1,7082±0,0391 k: 0,0004± 7,2693x10 <sup>-6</sup>	β: 1,7082±0,0391 α: 2718,6740± 54,2297
LRW70	k: 0,0012±0,0	k: 0,0012±0,0 a: 1,2885±0,0274	n: 1,6002±0,0656 k: 1,0016x10 <sup>-5</sup> ± 5,0701x10 <sup>-6</sup>	n: 1,6002±0,0656 k: 0,0007± 3,3859x10 <sup>-5</sup>	β: 1,6002±0,0656 α: 1411,1359± 66,1309
RW50	k: 0,0005±0,0001	k: 0,0006±0,0001 a: 1,8258±0,2677	n: 1,3428±0,1867 k: 4,8888x10 <sup>-5</sup> ± 6,8534x10 <sup>-5</sup>	n: 1,3428±0,1867 k: 0,0003± 2,4392x10 <sup>-5</sup>	β: 1,3428±0,1867 α: 2911,0288± 213,4451
RW60	k: 0,0008±0,0001	k: 0,0009±0,0002 a: 1,4753±0,4055	n: 1,3165±0,1289 k: 7,4158x10 <sup>-5</sup> ± 7,6673x10 <sup>-5</sup>	n: 1,3165±0,1289 k: 0,0005± 6,8232x10 <sup>-5</sup>	β: 1,3165±0,1289 α: 1851,8784± 248,5835
RW70	k: 0,0011±0,0001	k: 0,0011±0,0001 a: 1,1640±0,2721	n: 1,0939±0,1264 k: 7,4473x10 <sup>-4</sup> ± 6,9335x10 <sup>-4</sup>	n: 1,0939±0,1264 k: 0,0010± 2,7996x10 <sup>-4</sup>	β: 1,0939±0,1264 α: 1031,6402± 265,5229

La información del contenido de humedad obtenida del secado de puré de Physalis por diferentes métodos de secado se convirtieron a MR y estos se ajustados a 5 modelos de secado de capa fina: el modelo de Newton, Hendersos y Pabis, Page, Page modificado y el modelo de Weibull. Los coeficientes calculados para cada modelo se encuentran en la tabla 5.

#### **13.4.1 Parámetros estadísticos de modelos matemáticos**

Para analizar el ajuste de los modelos aplicados para los procesos de secado se cálculos los parámetros estadísticos de Chi-cuadrado ( $X^2$ ) y residuo de cuadrados residuales (SSE), valores bajos en los resultados de estos parámetros indican un buen ajuste del modelo para el proceso de secado, por lo que para seleccionar el modelo con menor ajuste para el secado de puré de Physalis se escoge el modelo con el que se obtuvo un menor valor de  $X^2$  (Doymaz, 2015) y de SSE (Doymaz, 2004).

Los resultados muestran que el modelo de Weibull es el modelo con valores de  $X^2$  y SSE más bajos entre los cinco modelos estudiados (tabla 6), por lo cual es el modelo seleccionado para describir el comportamiento del puré de Physalis durante el secado convectivo por aire caliente (HAD), convectivo de aire caliente asistido con luz infrarroja (IR) y de Ventana de Refractancia (en escala de laboratorio (LRW) y de equipo industrial (RW) de puré de Physalis a 50, 60 y 70°C.

Tabla 6: Resultado de los parámetros estadísticos de los modelos matemáticos

parámetros estadísticos - Modelos matemáticos										
	NEWTON		H-P		WEIBULL		PAGE		PAGE M	
Secado	SSE	X2	SSE	X2	SSE	X2	SSE	X2	SSE	X2
HAD50	0,017	0,019	0,093	0,124	0,000	6,392 x10 <sup>-05</sup>	0,002	2,400 x10 <sup>-03</sup>	0,000	6,422 x10 <sup>-05</sup>
HAD60	0,038	0,044	0,025	0,033	0,001	7,750 x10 <sup>-04</sup>	0,005	6,659 x10 <sup>-03</sup>	0,001	7,232 x10 <sup>-04</sup>
HAD70	0,014	0,015	0,077	0,102	0,000	1,336 x10 <sup>-04</sup>	0,005	6,253 x10 <sup>-03</sup>	0,000	1,709 x10 <sup>-04</sup>
IR50I	0,034	0,038	0,234	0,312	0,001	7,994 x10 <sup>-04</sup>	0,002	2,477 x10 <sup>-03</sup>	0,001	8,446 x10 <sup>-04</sup>
IR50m	0,013	0,016	0,033	0,056	0,000	1,158 x10 <sup>-04</sup>	0,005	7,958 x10 <sup>-03</sup>	0,000	1,247 x10 <sup>-04</sup>
IR50h	0,025	0,032	0,119	0,199	0,001	1,382 x10 <sup>-03</sup>	0,013	2,090 x10 <sup>-02</sup>	0,001	1,400 x10 <sup>-03</sup>
IR60I	0,020	0,023	0,168	0,235	0,001	7,868 x10 <sup>-04</sup>	0,005	7,699 x10 <sup>-03</sup>	0,001	8,550 x10 <sup>-04</sup>
IR60m	0,015	0,018	0,082	0,123	0,001	1,128 x10 <sup>-03</sup>	0,002	3,155 x10 <sup>-03</sup>	0,001	1,189 x10 <sup>-03</sup>
IR60h	0,018	0,024	0,021	0,042	0,006	1,161 x10 <sup>-02</sup>	0,020	4,058 x10 <sup>-02</sup>	0,006	1,157 x10 <sup>-02</sup>
IR70I	0,023	0,027	0,225	0,316	0,001	1,383 x10 <sup>-03</sup>	0,000	0,000	0,001	1,455 x10 <sup>-03</sup>
IR70m	0,006	0,008	0,010	0,019	0,000	8,277 x10 <sup>-05</sup>	0,000	0,000	0,000	8,722 x10 <sup>-05</sup>
IR70h	0,029	0,034	0,123	0,172	0,002	2,380 x10 <sup>-03</sup>	0,000	0,000	0,002	2,406 x10 <sup>-03</sup>
LRW50	0,024	0,026	0,181	0,226	0,001	1,084 x10 <sup>-03</sup>	0,012	1,700 x10 <sup>-02</sup>	0,001	1,112 x10 <sup>-03</sup>
LRW60	0,017	0,021	0,152	0,228	0,000	3,728 x10 <sup>-04</sup>	0,000	0,000	0,000	3,741 x10 <sup>-04</sup>
LRW70	0,003	0,004	0,023	0,046	0,000	1,220 x10 <sup>-07</sup>	0,000	0,000	0,000	8,226 x10 <sup>-07</sup>
RW50	0,008	0,009	0,049	0,056	0,000	3,793 x10 <sup>-04</sup>	0,000	0,000	0,000	3,897 x10 <sup>-04</sup>
RW60	0,006	0,007	0,018	0,022	0,000	3,172 x10 <sup>-04</sup>	0,000	0,000	0,000	3,259 x10 <sup>-04</sup>
RW70	0,008	0,009	0,007	0,009	0,006	7,044 x10 <sup>-03</sup>	0,000	0,000	0,007	8,113 x10 <sup>-03</sup>

Para un mejor análisis del ajuste del modelo de Weibull en los procesos de secado analizados y su selección como el más adecuado, se comparó los  $MR_{\text{experimentales}}$  con  $MR_{\text{predicho}}$  (valores de MR calculados por el modelo de ajuste en un tiempo t) (Karthikeyan & Murugavelh, 2018) en un gráfico, lo cual ayuda a validar el modelo seleccionado, ya que en el gráfico se puede observar que existe un “buen acuerdo” entre los valores, si la gráfica de los datos es una línea recta con inclinación de 45° se puede decir que hay un buen acuerdo entre los datos y se provee una evidencia extra de que el modelo es adecuado para predecir el proceso de secado (Doymaz, 2015). Los gráficos de los experimentos de secado para el modelo de Weibull se encuentran en la Figura 26.

En las gráficas de  $MR_{\text{experimental}} vs MR_{\text{predicho}}$  obtenidas (Figura 26) se puede apreciar el buen ajuste del modelo de Weibull para describir el proceso de secado, ya que todas las curvas de las gráficas corresponden a rectas con pendiente de  $45^\circ$ , demostrando la idoneidad  $MR_{\text{experimental}} vs MR_{\text{predicho}}$  de este modelo para el proceso de secado de puré de Physalis por aire convectivo, aire convectivo asistido con luz infrarroja y por el método de Ventana de Refractancia. De todos los tipos de secado el secado convectivo por aire caliente de  $70^\circ\text{C}$  y asistido por luz IR de 1000 Watts (IR70h) y el secado por Ventana de Refractancia a  $70^\circ\text{C}$  (RW70) y son los que presentan puntos que se alejan notoriamente de la curva recta de  $45^\circ$  ideal del ajuste, para ambos los valores de  $X^2$  y SSE calculados son de bajo valor, para IR70h hay un  $X^2$  de 0,002 y SSE de  $2,380 \times 10^{-03}$  y RW70 tiene un  $X^2$  de 0,006 y SSE de  $7,044 \times 10^{-03}$ , que son valores de menor valor, pero para estos dos caso los modelos de Page y Page modificado tienen menor valor, por lo cual para estos casos puntuales son estos los modelos que lograrían un mejor ajuste de la curva de secado con  $MR_{\text{predicho}}$ .

El modelo de Weibull es el mejor modelo para el secado de puré de Physalis en general, pero los modelos de Page y Page modificado también lograrían un ajuste adecuado (bajos  $X^2$  y SSE) para los procesos.

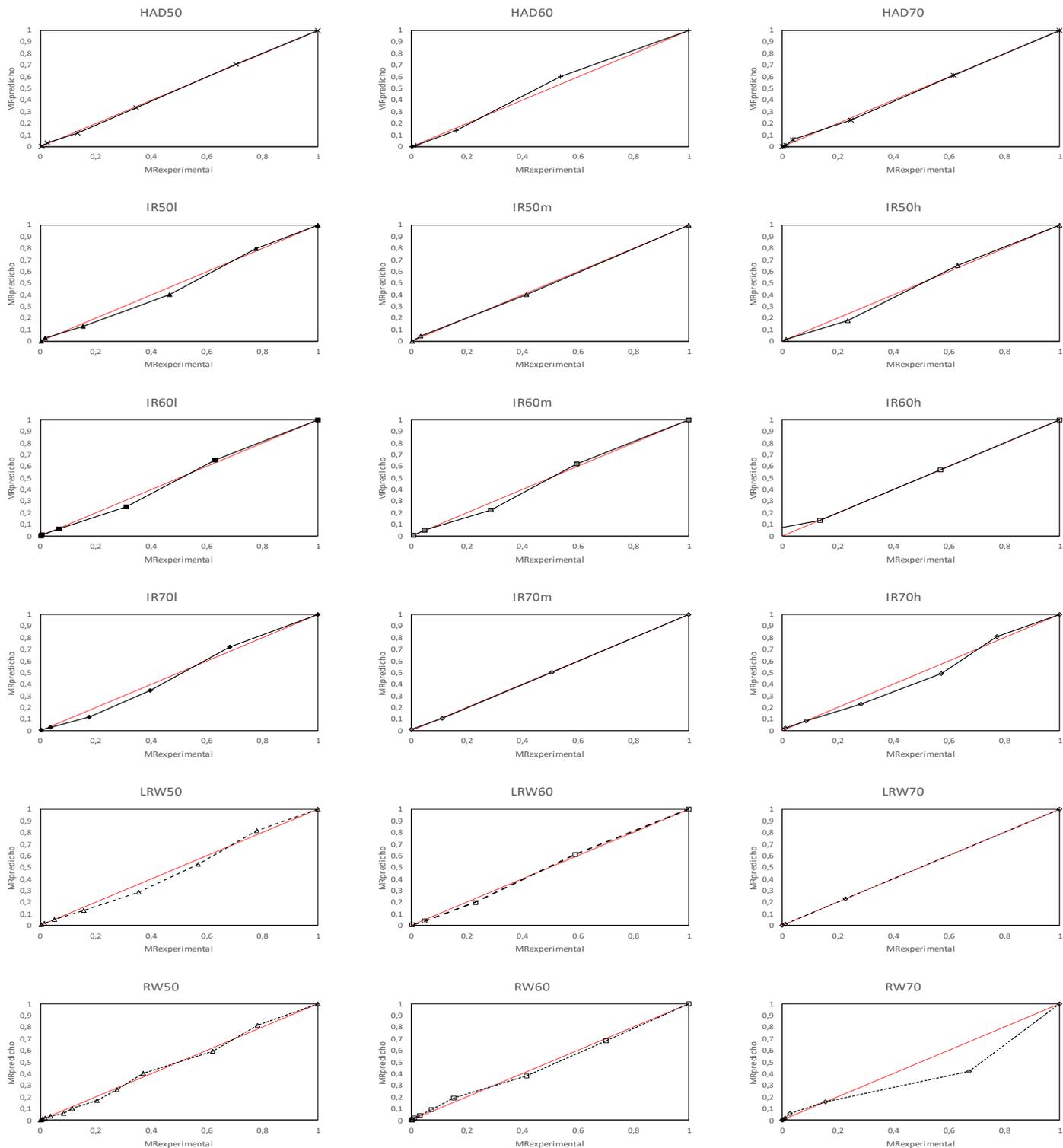


Figura 26: Gráficos entre  $MR_{\text{experimental}}$  vs  $MR_{\text{predicho}}$  para todos los tratamientos de secado, en donde la curva con línea de color negro corresponde a los valores de  $MR_{\text{predicho}}$  calculados con la ecuación del modelo de Weibull de cada secado y la línea roja corresponde a una curva recta con pendiente de  $45^\circ$  con la que se puede comparar el ajuste del modelo.

### 13.4.2 Tiempo de secado calculado por modelo matemático

Se realizó el cálculo del tiempo que necesitaría el puré de Physalis en alcanzar un MR de 0,002 al ser secado con los diferentes métodos utilizando la ecuación de Weibull obtenida para cada método de secado, con el objetivo de comparar el tiempo de cada método con un mismo resultado final, a este tiempo se le denominó tiempo predicho ( $t_{\text{predicho}}$ ). Los tiempos calculados son:

*Tabla 7: Tiempo predicho de secado para obtener MR de 0,002 con la ecuación de Weibull de cada método de secado.*

Tiempo predicho(min)	
Secado	Tiempo (min)
IR70h	33,697
IR60h	37,077
IR50h	37,867
IR70m	55,318
IR60m	71,306
LRW70	73,659
IR70I	85,060
IR50m	89,363
RW70	91,339
HAD60	109,327
RW60	123,633
LRW60	132,036
IR60I	146,892
HAD70	148,879
IR50I	157,132
HAD50	172,530
RW50	189,138
LRW50	236,930

Con los resultados obtenidos se puede comparar el tiempo predicho por cada método, en la tabla 7 y en la Figura 27 se puede distinguir que el método con el que se logra secar el puré de Physalis a un MR de 0,02 es el método de aire convectivo a 70°C asistido con luz infrarroja de 1000 W (IR70h) con un tiempo predicho según la ecuación del modelo de Weibull de 33,697 minutos y el método que más tiempo tomaría en alcanzar un MR de 0,02 es el de Ventana de Refractancia a 50°C en

escala de laboratorio (LRW50), con un tiempo predicho de 236,930 minutos, lo cual corrobora que los métodos con más de una fuente de calor resultan en menores tiempos de secado, de todos los métodos los que tenían asistencia con luz IR son los que se calculó un menor  $t_{\text{predicho}}$ .

Al comparar el  $t_{\text{predicho}}$  entre métodos se observa que hay una relación inversa entre el tiempo de secado y la temperatura del proceso, ya que como se indica en estudios del secado de Physalis, el tiempo de secado para alcanzar un contenido de humedad disminuye mientras la temperatura de procesamiento aumenta (Lopez et al., 2013). Para el método de Ventana de Refractancia se obtuvo  $t_{\text{predicho}}$  altos en comparación con los otros métodos, estos tiempos de secado se pueden explicar por la fuente de calor del método, que solo se encuentra desde el inferior de la capa final del puré de Physalis y que la humedad debe transportarse desde el inferior hasta la parte superior de la capa par su extracción. los resultados de  $t_{\text{predicho}}$  para los secados de Ventana de Refractancia a escala de laboratorio y Ventana de Refractancia en el equipo de escala industrial tienen valores similares.

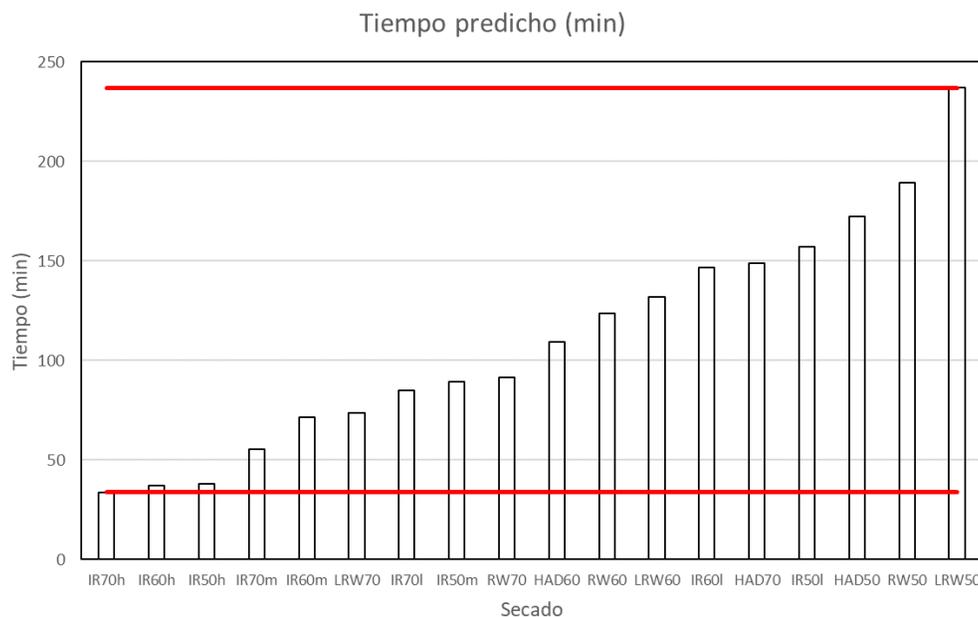


Figura 27: Tiempo predicho de secado en minutos calculado con la ecuación de Weibull obtenida de cada método de secado, las líneas rojas indican el tiempo mínimo y el tiempo máximo predichos.

### 13.5. Eficiencia de secado

Tabla 8: Valores calculados de la eficiencia de secado (DE), eficiencia energética ( $\eta_e$ ), energía para la evaporación de humedad ( $Q_w$ ) energía para calentar el material ( $Q_m$ ), consumo de energía mecánica ( $EU_{mec}$ ) y consumo de energía térmica ( $EU_{ter}$ ) para el secado de puré de *Physalis* por todos los tratamientos de secado realizados

Secado	DE (%)	$\eta_e$ (%)	$Q_w$ (kJ)	$Q_m$ (kJ)	$EU_{ter}$ (kJ)	$EU_{mec}$ (kJ)
HAD50	74,111±1,436	72,856±1,422	9,773×10 <sup>07</sup> ±1,907×10 <sup>06</sup>	1,684×10 <sup>06</sup> ±2,316×10 <sup>04</sup>	1,341×10 <sup>06</sup>	2,310
HAD60	66,057±2,490	64,698±2,446	1,011×10 <sup>08</sup> ±3,822×10 <sup>06</sup>	2,123×10 <sup>06</sup> ±6,879×10 <sup>04</sup>	1,562×10 <sup>06</sup>	2,310
HAD70	55,412±1,802	54,071±1,771	9,879×10 <sup>07</sup> ±3,236×10 <sup>06</sup>	2,450×10 <sup>06</sup> ±5,762×10 <sup>04</sup>	1,827×10 <sup>06</sup>	1,320
IR50l	76,828±2,960	87,072±3,159	1,038×10 <sup>08</sup> ±4,055×10 <sup>06</sup>	1,822×10 <sup>06</sup> ±6,540×10 <sup>04</sup>	1,374×10 <sup>06</sup>	2,310
IR50m	88,401±4,443	67,048±0,970	1,194×10 <sup>08</sup> ±6,016×10 <sup>06</sup>	2,088×10 <sup>06</sup> ±9,281×10 <sup>04</sup>	1,375×10 <sup>06</sup>	1,210
IR50h	71,192±1,132	55,348±3,837	9,598×10 <sup>07</sup> ±1,514×10 <sup>06</sup>	1,809×10 <sup>06</sup> ±4,317×10 <sup>04</sup>	1,374×10 <sup>06</sup>	0,440
IR60l	71,388±3,120	76,969±0,753	1,134×10 <sup>08</sup> ±4,963×10 <sup>06</sup>	2,425×10 <sup>06</sup> ±1,030×10 <sup>05</sup>	1,623×10 <sup>06</sup>	1,980
IR60m	65,031±6,111	61,254±2,465	1,033×10 <sup>08</sup> ±9,708×10 <sup>06</sup>	2,226×10 <sup>06</sup> ±2,100×10 <sup>05</sup>	1,622×10 <sup>06</sup>	0,825
IR60h	62,874±0,920	53,676±1,037	9,982×10 <sup>07</sup> ±1,474×10 <sup>06</sup>	2,160×10 <sup>06</sup> ±2,427×10 <sup>04</sup>	1,622×10 <sup>06</sup>	0,330
IR70l	49,263±1,931	75,503±2,950	8,915×10 <sup>07</sup> ±3,485×10 <sup>06</sup>	2,313×10 <sup>06</sup> ±1,010×10 <sup>05</sup>	1,857×10 <sup>06</sup>	0,990
IR70m	53,201±1,047	86,882±4,377	9,630×10 <sup>07</sup> ±1,872×10 <sup>06</sup>	2,468×10 <sup>06</sup> ±7,292×10 <sup>04</sup>	1,857×10 <sup>06</sup>	0,495
IR70h	52,115±2,884	69,875±1,102	9,436×10 <sup>07</sup> ±5,251×10 <sup>06</sup>	2,419×10 <sup>06</sup> ±1,47×10 <sup>05</sup>	1,857×10 <sup>06</sup>	0,330
LRW50	88,578±3,153	69,893±3,058	1,168×10 <sup>08</sup> ±4,237×10 <sup>06</sup>	2,020×10 <sup>06</sup> ±9,153×10 <sup>03</sup>	1,341×10 <sup>06</sup>	2,310
LRW60	68,534±0,973	63,658±5,984	1,086×10 <sup>08</sup> ±1,571×10 <sup>06</sup>	2,408×10 <sup>06</sup> ±4,685×10 <sup>03</sup>	1,620×10 <sup>06</sup>	1,650
LRW70	56,712±3,847	61,542±0,909	1,011×10 <sup>08</sup> ±7,010×10 <sup>06</sup>	2,491×10 <sup>06</sup> ±1,954×10 <sup>04</sup>	1,827×10 <sup>06</sup>	0,990
RW50	78,651±0,707	48,017±1,977	4,604×10 <sup>08</sup> ±4,504×10 <sup>06</sup>	1,006×10 <sup>07</sup> ±2,733×10 <sup>05</sup>	5,982×10 <sup>06</sup>	2,145
RW60	62,914±2,264	51,872±1,008	4,631×10 <sup>08</sup> ±1,864×10 <sup>07</sup>	1,255×10 <sup>07</sup> ±1,522×10 <sup>06</sup>	7,561×10 <sup>06</sup>	1,650
RW70	55,324±0,960	50,812±2,828	4,647×10 <sup>08</sup> ±8,980×10 <sup>06</sup>	1,427×10 <sup>07</sup> ±9,550×10 <sup>05</sup>	8,658×10 <sup>06</sup>	1,320

Al comparar los valores de los elementos de la eficiencia de secado ( $Q_w$ ,  $Q_m$ ,  $EU_{ter}$  y  $EU_{mec}$ ) y la eficiencia de secado (DE) de los procesos de secado de puré de *Physalis*, comparando los resultados para el secado de Ventana de Refractancia con los otros métodos, se obtiene que se necesita una mayor cantidad de energía para la evaporación de humedad ( $Q_w$ ), ya que para el secado RW entre 50 y 70°C se necesita entre 4,604×10<sup>08</sup> y 4,647×10<sup>08</sup> kJ y para LRW entre 50 y 70°C la necesaria es entre el rango de 1,168×10<sup>08</sup> y 1,011×10<sup>08</sup> kJ, valores similares también se obtuvo para HAD60 (1,011×10<sup>08</sup> kJ), IR50l (1,038×10<sup>08</sup> kJ), IR50m (1,194×10<sup>08</sup> kJ), IR60l (1,134×10<sup>08</sup> kJ) y IR60m (1,033×10<sup>08</sup> kJ), el secado por aire convectivo a 70°C asistido con IR (250 – 1000 W) es el que tiene menores valores de  $Q_w$ , siendo IR70l el menor con  $Q_w$ : 8,915×10<sup>07</sup> kJ.

El secado de RW es el método que necesitan mayor energía para calentar el material ( $Q_m$ ) con valores de  $4,631 \times 10^8$ ,  $4,631 \times 10^8$  y  $4,647 \times 10^8$  kJ para las temperaturas de 50, 60 y  $70^\circ\text{C}$ , respectivamente. Mientras que la menor cantidad de energía se necesitó en HAD50  $1,684 \times 10^6$  kJ.

En los secados de RW presenta también los mayores valores consumo de energía térmica ( $EU_{\text{ter}}$ ), RW50 consumió  $5,982 \times 10^6$  kJ, RW60  $7,561 \times 10^6$  kJ y RW70  $8,658 \times 10^6$  kJ, valores mayores que todos los otros tipos de secado, de los cuales el más cercano son los de IR70l, IR70m y IR70h con un  $EU_{\text{ter}}$  de  $1,857 \times 10^6$  kJ, los secados con menor consumo de energía mecánica fueron HAD50 ( $EU_{\text{ter}}$  :  $1,341 \times 10^6$  kJ) y LRW50 ( $EU_{\text{ter}}$ :  $1,341 \times 10^6$  kJ). En el consumo de energía mecánica RW no destaca como un tipo de secado de alto o bajo consumo entre los tipos de secado comparados.

En la eficiencia de secado RW obtuvo porcentajes de 78,659 para RW50, 62,914 para RW60 y 55,324 para RW70, mostrando una tendencia a la disminución de DE con el aumento de temperatura y una mayor energía utilizada en comparación con el consumo de esta. Este fenómeno se ve en todos los secados menos en los secados IR a  $50^\circ\text{C}$  e IR a  $70^\circ\text{C}$ , en los que también influye el poder de la lámpara IR en el consumo de energía térmica. Los mejores resultados de DE los obtuvieron los secados híbridos de aire convectivo asistido con luz infrarroja a 50 y  $60^\circ\text{C}$ , lo que concuerda con que los secados realizados con métodos híbridos obtienen mayor eficiencia de secado (Motevali et al., 2014).

Como se puede observar en la Figura 28, RW50 está en un grupo homogéneo con el secado IR50l, RW60 se encuentra en el mismo grupo con HAD60, IR60m y IR60h, mientras que RW70 está en un grupo homogéneo con IR70h y comparte en dos grupos simultáneamente con HAD70 y IR70m, con el resto de los secados presentas diferencias significativas, se puede ver que hay una tendencia de los secado RW de tener valores de DE parecidos entre secados con la misma

temperatura , aunque no hay energía y consumo energía similar entre estos procesos, la razón entre ella si lo es. Además, se puede notar que RW está en grupos en los que está involucrada la radiación en el proceso.

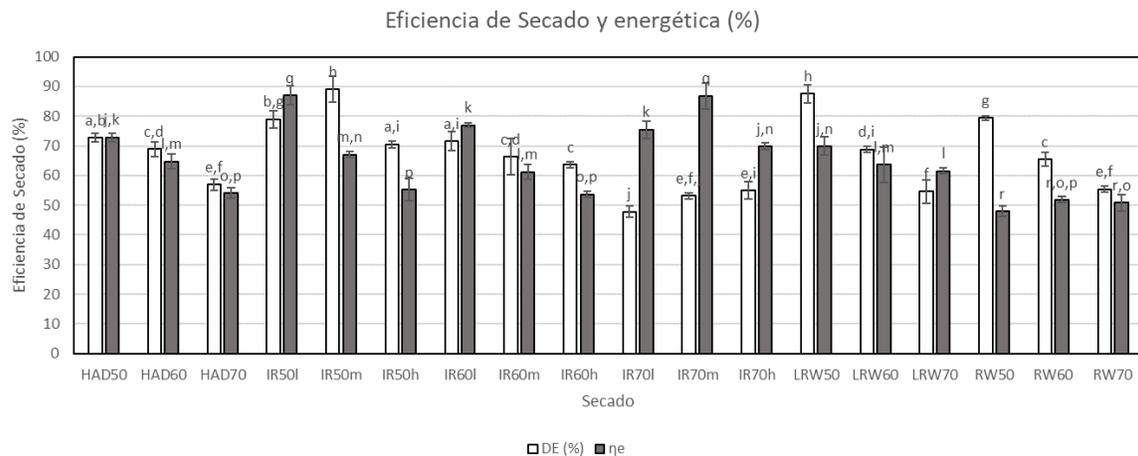


Figura 28: Eficiencia de secado (%) de cada proceso de secado, las letras minúsculas (a-j) indican los grupos homogéneos resultado de la ANOVA de una vía

Los resultados de los valores de eficiencia energética ( $\eta_e$ ) muestran que los secados de RW son los que tienen menores valores entre los métodos analizados, para el secado de Ventana de Refractancia entre 50-70°C se obtuvo una eficiencia energética de 48,9 a 50,8%, esto se debe a los altos valores de consumo de energía térmica ( $EU_{ter}$ ) involucrado en el proceso de RW, en el secado convectivo  $EU_{ter}$  corresponde a la energía para calentar el aire (Motevali et al., 2014) por lo que para el caso de RW,  $EU_{ter}$  correspondería a la energía para calentar el agua de los estanque (principal responsable del alto consumo de energía, aun cuando los procesos de secado se iniciaron con el agua a la temperatura necesaria) y el film de Mylar® los que necesita más energía para calentarse que el aire.

Los resultados de  $\eta_e$  son mayores a lo reportados en la literatura, en donde la eficiencia energética del secado RW varía entre 28,7 a 37,9% para productos alimenticios (Menon et al., 2020), estos resultados se podrían explicar en las condiciones de secado del producto, el cual tiene un alto porcentaje de agua y al haber pasado por un proceso de trituración previa, esta se encuentra en estado libre

permitiendo su evaporación. Esto último también podría explicar la razón de que la eficiencia energética de todos los secados sea mayor que la reportada en la literatura, para los secadores de aire convectivo reportan entre 1,91 y 6,76% de eficiencia energética a temperaturas entre 45 y 70 °C, y en los que se apunta al consumo de energía térmica al término más influyente en los resultados, debido a la gran cantidad de energía consumida para calentar el aire (Beigi, 2016). Al igual que los resultados de la eficiencia de secado, la eficiencia energética del método de secado de Ventana de Refractancia son los menores porcentajes obtenidos entre los métodos de secado estudiados, esto también influenciado por los valores de consumo de energía térmica ( $EU_{ter}$ ), que son mayores para calentar el agua del estanque que el aire de los otros secados.

## 13.6. Color

### 13.6.1 Color inicial de las muestras

Las muestras de puré de *Physalis* antes del proceso de secado tenían valores de las coordenadas de color CIE de  $L^*$ :  $86,0 \pm 5,385$ ,  $a^*$ :  $7,667 \pm 6,652$  y  $b^*$ :  $85,222 \pm 5,094$ , las que describen un color superficial amarillo intenso con un tono rojizo suave con alta luminosidad, el valor de  $H^\circ$  es de  $84,793 \pm 4,099^\circ$ , que se encuentra en la zona correspondiente a la zona amarilla ( $90^\circ$ ) con el ángulo en una leve cercanía a la zona roja ( $60^\circ$ ) y el valor  $C^*$  de la muestra es de  $85,7 \pm 3,5$  que indica una alta saturación del color de las muestras.

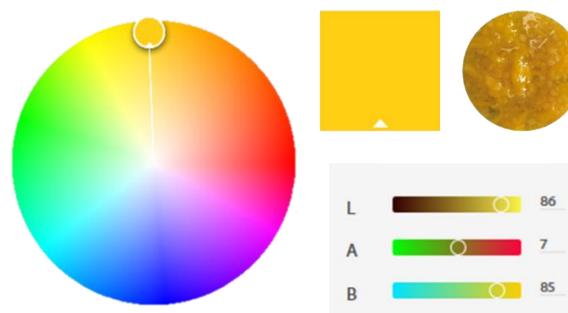


Figura 29: Color inicial del puré de *Physalis* representado en la rueda de color, imagen del color obtenida desde la rueda, valores Lab representados en sus ejes correspondientes e imagen de muestra inicial (Fuente: Adobe Color)

### 13.6.2. Color superficial

Los resultados obtenidos de los parámetros de color superficial de las muestras iniciales, sin secar, y las muestras secas por los diferentes tratamientos se muestran en la tabla 10, a continuación:

Tabla 9: Resultado de los parámetros  $\Delta E$ ,  $C^*$ ,  $\Delta C^*$ ,  $H^\circ$  y  $\Delta H^\circ$  del color superficial de las muestras secadas por los distintos tipos de secados

Parámetros de color superficial					
Secado	$\Delta E$	$C^*$	$\Delta C^*$	$H^\circ$	$\Delta H^\circ$
Inicial	-	85,7±3,5	-	84,8±4,1	-
HAD50	86,6±77,9	82,2±2,7	-3,6±6,1	73,4±3,4	-11,4±6,4
HAD60	216,9±160,9	70,5±5,1	-14,9±9,7	77,4±2,6	-7,4±6,7
HAD70	739,2±275,6	57,8±5,5	-27,9±3,6	63,1±2,9	-21,7±3,3
IR50I	155,0±86,8	80,7±3,9	-5,1±7,4	74,9±3,4	-9,9±6,5
IR50m	817,4±712,0	57,1±10,9	-28,6±9,5	69,2±7,5	-15,6±3,5
IR50h	1931,6±2453,2	46,9±33,6	-38,8±31,3	67,2±9,6	-17,6±5,9
IR60I	969,0±1054,9	56,3±19,7	-29,4±20,2	70,9±14,8	-13,9±18,1
IR60m	1002,6±602,5	59,9±14,6	-25,8±13,1	66,3±3,9	-18,5±6,0
IR60h	1911,2±1728,6	46,3±30,6	-39,5±27,4	64,5±15,7	-20,1±13,4
IR70I	363,4±33,9	71,1±3,7	-14,6±5,0	74±1,0	-10,8±4,4
IR70m	2163,9±2219,7	44,3±29,5	-41,4±26,3	64,3±13,0	-20,5±9,2
IR70h	2625±3133,4	43,7±33,7	-42,0±33,2	59,2±18,3	-25,6±20,8
LRW50	1204,9±227,9	68,3±3,6	-17,4±6,7	71,1±2,0	-13,7±6,0
LRW60	556,1±186,2	80,5±6,0	-5,2±2,5	73,3±2,7	-11,5±2,4
LRW70	454,0±145,8	85,2±1,0	-0,5±3,2	75,3±3,5	-9,5±7,6
RW50	553,4±400,7	38,3±9,0	-25,5±10,0	68,9±3,5	-5,9±5,3
RW60	198,0±103,7	46,4±4,1	-17,0±3,8	71,3±5,7	-6,7±5,4
RW70	196,5±176,6	52,6±6,5	-14,2±8,3	70,7±2,5	-4,7±4,2

Los parámetros de color superficial de las muestras finales muestran que con el proceso de secado se produjo un efecto sobre el color, estos parámetros presentan altas desviaciones estándar en los resultados presentados debido a el resultado del color final no es el mismo entre las muestras de las diferentes repeticiones de un mismo secado ni tampoco el color superficial es parejo en toda la muestra, esto último era más notorio en los secados por aire convectivo asistido con luz infrarroja (IR) en donde las muestras secas en las bandejas en las que se realizó el proceso presentaba zonas de color amarillo cafésoso, zonas de color café de diferentes tonalidades y en el caso de los tratamientos más intensos (IR70m y IR70h) se podían encontrar zonas cafés con tonalidades negras, propias de lo que se describiría como el inicio de una carbonización de la muestra, las tonalidades más oscura se encontraban mayormente en los bordes de las muestras. Además, en las muestras secas se encuentran más concentradas las pepas del fruto que en las muestras iniciales, debido a la contracción de las muestras, por lo que en las muestras es más notorio el color blanco de las pepas y no es posible separarlo en la medida de los parámetros de color.

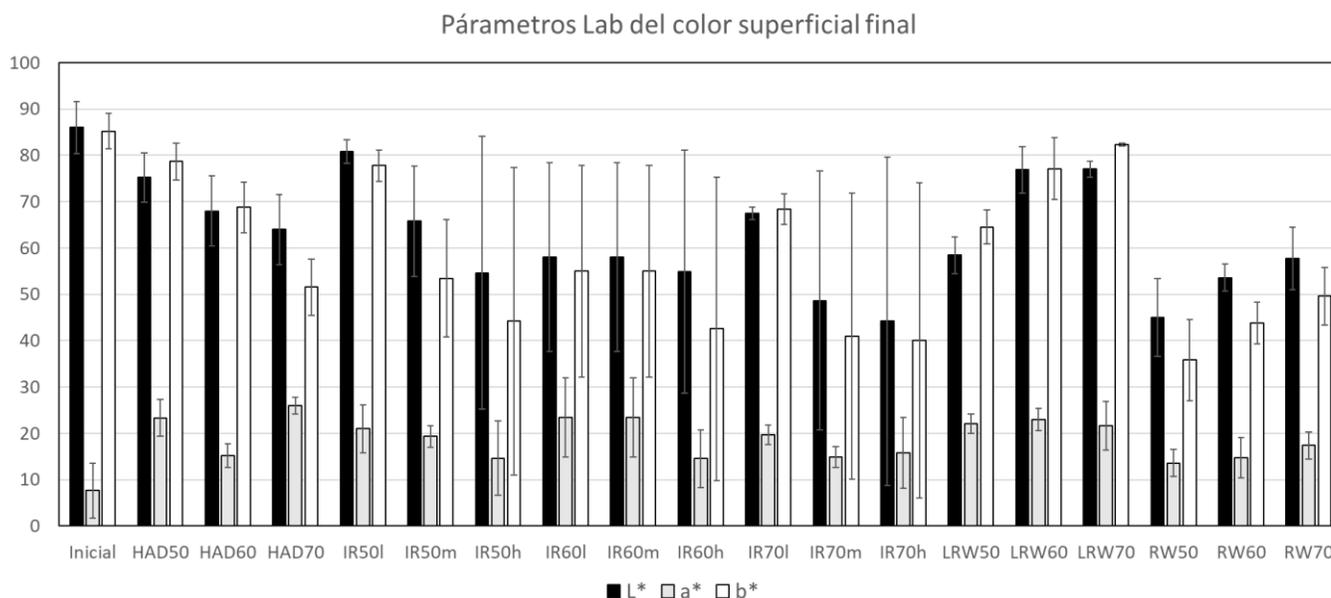


Figura 30: Parámetros Lab del color superficial de las muestras inicial y finales (secas)

Los resultados de los parámetros Lab de las muestras presentan una disminución del valor de L\*, aumento del valor de a\* y disminución del valor de b\*, indicando que las muestras secas en general tienen un color menos luminoso, con rojo más intenso y con color amarillo menos intenso que las muestras iniciales.

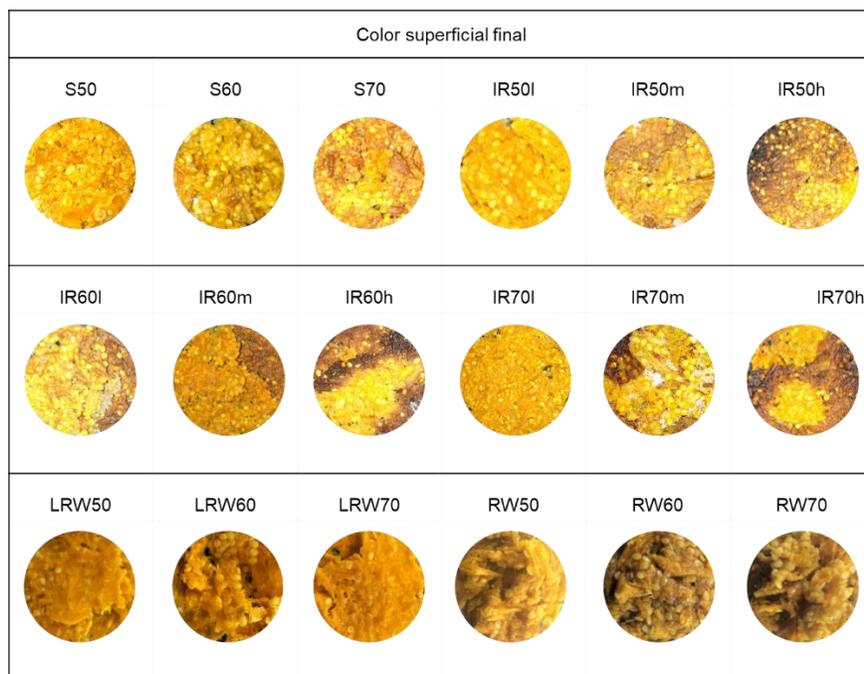


Figura 31: Color superficial final de las muestras secas

### 13.6.3. Cambio de color ( $\Delta E$ )

De los resultados obtenidos del parámetro de cambio de color ( $\Delta E$ ) el tratamiento que obtuvo un valor mayor, indicando como un mayor cambio de color medido en valores de las coordenadas L\*a\*b\* en comparación los valores de esta mismas de las condición inicial o muestra sin secar, fue el del tratamiento IR70h ( $\Delta E$ : 2625), en el cual se aplicó una alta temperatura y una alta intensidad de luz infrarroja, otros tratamientos con estas condiciones como IR70m, IR60h, IR60m, IR50h y IR50m también tuvieron valores altos de  $\Delta E$ . En cambio, el tratamiento con menor valor de cambio de color es el HAD50 ( $\Delta E$ :86,6), en el cual se secó con la menor temperatura aplicada a las muestras, otros tratamientos con bajo valor de  $\Delta E$  son IR50I, RW60 y RW70, el primero con la menor temperatura e intensidad aplicada a las muestras

y los otros dos son tratamientos de alta temperatura, pero por el método de secado de Ventana de Refractancia.

Los resultados de  $\Delta E$  muestran que se produce un menor cambio de color cuando se aplican temperaturas e intensidad de luz infrarroja menores, aunque esto no se cumple para tratamientos de secado de Ventana de Refractancia, en donde hay un mayor  $\Delta E$  en LRW50 y RW50, donde se secó a la menor temperatura, de 50°C, lo cual se debe a los mayores tiempos de secado.

El cambio de color producido por los procesos de secado se debe a que con la pérdida de humedad se concentran los pigmentos de las muestras, se produce pardeamiento enzimático y pardeamiento no enzimático, o reacción de Maillard, el que es promovido por las altas temperaturas del secado (Vásquez-Parra et al., 2013) y por la degradación de los pigmentos presentes como los carotenoides (Lopez et al., 2013), los que están presentes en el fruto Physalis.

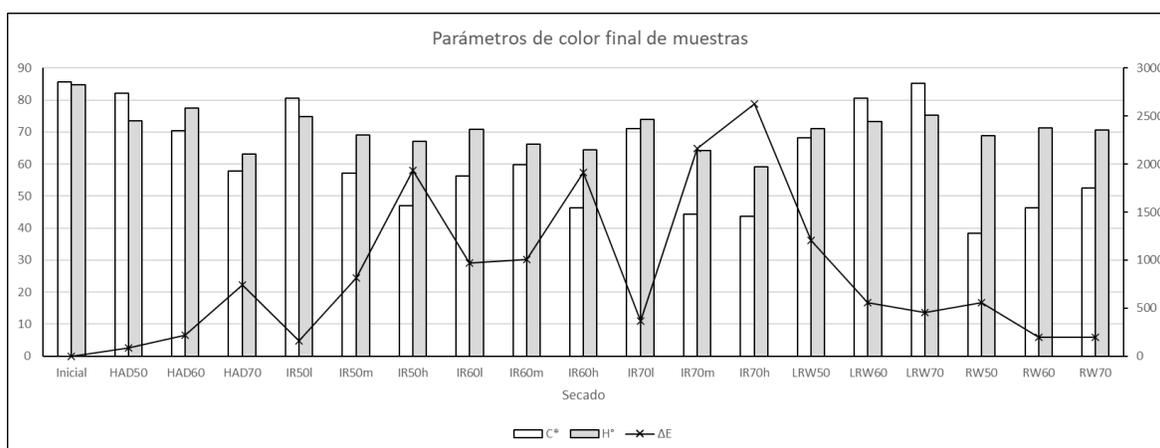


Figura 32: Parámetros E, C\* y H° obtenidos del color superficial de las muestras finales

### 13.6.4 Valor Croma (C\*)

Todas las muestras secas tienen un valor de C\* menor que el C\* de las muestras sin secar, o  $\Delta C^*$  negativos, lo que indica que luego del proceso de secado el

resultado son muestras con colores más pálidos (Vásquez-Parra et al., 2013). Las muestras de LRW70 son las cuales tiene un mayor valor de  $C^*$  y el más cercano al valor  $C^*$  del estado inicial, mientras que las muestras secadas con el tratamiento RW50 tienen el valor más bajo y el más lejano a la inicial. La saturación final de las muestras expresadas como  $C^*$  no tiene una tendencia general para cada tipo de secado, ya que en el caso de los tratamientos HAD el valor  $C^*$  disminuye con la temperatura, pero en el caso de los tratamientos LRW y RW,  $C^*$  final aumenta con la temperatura del tratamiento, y para el secado por aire convectivo asistido con luz infrarroja no hay tendencia clara, a 50°C hay disminución de  $C^*$  con el aumento de temperatura, pero no hay una tendencia para la combinación tipo de secado y temperatura o tipo de secado e intensidad de luz IR, pero se puede ver en la Figura 32 y en la tabla 9 que las muestras de este tratamiento obtienen valores de  $C^*$  bajos.

Las muestras iniciales tienen diferencias significativas con todos los procesos de secado menos con HAD50, HAD60, IR50I, IR70I, LRW60 y LRW70, para los tres primeros la causa de esto puede deberse a que son procesos poco intensos por la baja temperatura y luz IR utilizada en ellos y los últimos tres al ser procesos que requieren poco tiempo, esto influye en evitar que disminuya la saturación de las muestras. Estos seis procesos tienen diferencias significativas con todos los procesos de HAD asistida con IR, con excepción de las mencionadas IR50I y IR70I.

Para todas las muestras secas el valor de  $\Delta C^*$  es negativo, indicando que después de cualquier proceso de secado, este disminuye la saturación de los colores de las muestras secadas (Nielsen, 2010). El resultado negativo de  $\Delta C^*$  también ha sido documentado en el secado convectivo de *Physalis* (Vásquez-Parra et al., 2013).

### **13.6.5 Ángulo Hue ( $H^\circ$ )**

Todas las muestras secas presentaron un ángulo Hue menor que el ángulo de la muestra inicial sin secar, alejando el color del ángulo de 84° del color amarillo anaranjado y acercándolo a ángulos del naranja y zonas más rojas (ángulo de 0°)

(Dehghannya et al., 2019), en el tratamiento IR70h se obtienen muestras con el menor Hue ( $H^\circ: 59,2 \pm 18,3$ ) con el color naranja más intenso de todas las muestras y el tratamiento de mayor  $H^\circ$  es HAD60, cuyas muestras tienen color naranja con menor intensidad, pero aun así es un color alejado del amarillo en el que se encuentra su color inicial, el resto de los tratamientos se encuentran todos los valores de  $H^\circ$  entre la zona comprendida entre HAD60 y IR70h desde naranja claro a naranja intenso.

El ángulo  $H^\circ$  de las muestras iniciales tienen diferencias significativas con todos los secados menos HAD50, HAD60, IR50I, IR70I, LRW60 y LRW70, que son los mismos tratamientos que no presentan diferencias significativas en  $C^*$ , por lo que este resultado se produce por las mismas causas que en  $C^*$ .

Todos los  $\Delta H^\circ$  obtenidos son negativos, de estos valores obtenidos, los tratamientos con asistencia de luz infrarroja de intensidad media y alta son los que obtuvieron menores valores de  $H^\circ$  (IR50m, IR50h, IR60m, IR60h, IR70m y IR70h), mientras que los valores más altos de  $H^\circ$  están en las muestras en las que se usa la menor temperatura ( $50^\circ$ ) o con la que se utilizó la menor intensidad de IR para el secado (baja de 250W) como en HAD60 o IR70I, todas las muestras presentaron un efecto en que su color se movió en la dirección hacia el color rojo (Nielsen, 2010).

### **13.6.6 Índice de Pardeamiento (BI)**

Los resultados de los índices de pardeamiento calculados de las muestras secas se pueden examinar en el gráfico de la Figura 33, el BI es el índice para medir la formación de color café en las muestras secas, un mayor índice indica una mayor formación de pigmentos de color café producidos por las reacciones de pardeamiento, de las muestras secas analizadas, las producidas por secado convencional (BI en el rango de 1,706 – 2,505) y secado por Ventana de Refractancia (BI en el rango de 2,302 – 2,852) son las que mayor índice obtuvieron y de los cuales el método que utiliza una menor temperatura (y por consecuencia tiene un mayor tiempo) genera muestras con mayor índice de pardeamiento.

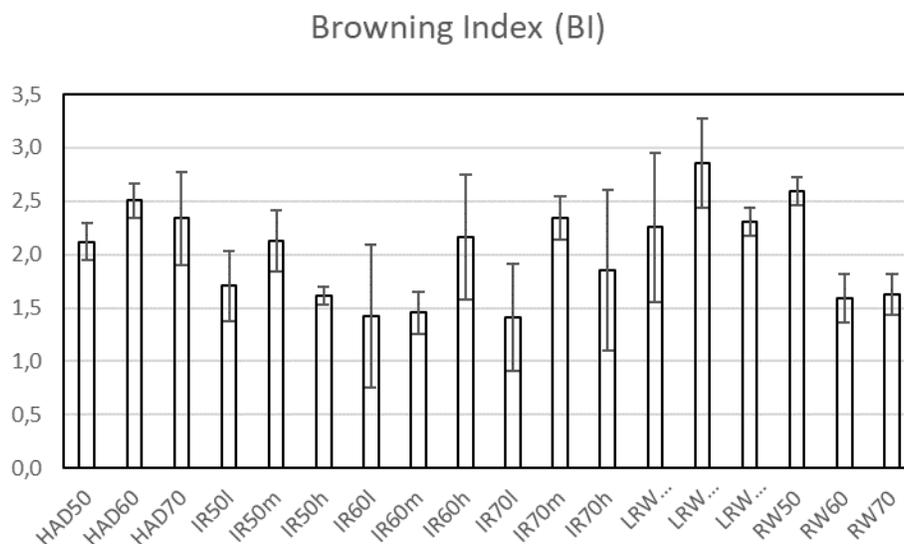


Figura 33: índice de pardeamiento (BI) calculado para las muestras secas de puré de *Physalis*

Para los procesos de secado el cambio de color que se produce en los alimentos al ser sometidos a este tipo de tratamiento que involucra altas temperaturas, se produce comúnmente por procesos de la reacción de Maillard (Pathare et al., 2013), en donde ocurren una serie de reacciones químicas entre azúcares reductores y compuestos amino, que se puede traducir en una pérdida nutricional de aminoácidos esenciales, por lo cual en estos casos la reacción es desfavorable en el producto final (Jaeger et al., 2010).

Para las muestras secas es importante realizar un proceso en que el pardeamiento producido sea el menor posible, esto se logra en los procesos de realizados con aire convectivo asistido con luz IR y en los secado por Ventana de Refractancia, esto debido a que las principales variables que afectan la reacción de Maillard son el tiempo y la temperatura (Jaeger et al., 2010), esto se refleja en los resultados de BI de los procesos asistidos con IR, ya que estos son procesos que necesitan menores tiempos para secar las muestras, lo que resultó en bajos valores de BI.

### 13.6.7 Evolución del color durante el proceso de secado por Ventana de Refractancia

Los efectos del proceso de secado en el color superficial durante el proceso de secado se analizaron calculando el  $\Delta E$ ,  $C^*$  y  $H^\circ$  en el tiempo, valores que se encuentran en la tabla 10:

Tabla 10: Color de muestras tratadas con Ventana de Refractancia en el tiempo.

Tiempo (min)	RW50			RW60			RW70		
	$\Delta E$	$C^*$	$H^\circ$	$\Delta E$	$C^*$	$H^\circ$	$\Delta E$	$C^*$	$H^\circ$
0		63,9±2,5	74,8±2,0		63,4±3,5	78,0±1,2		66,8±6,6	75,3±3,0
15	86,1±69,0	62,2±5,4	82,1±1,5	46,8±34,9	67,6±5,3	75,4±3,1	100,8±89,6	60,7±7,3	78,2±2,9
30	74,8±48,3	55,4±4,8	80,4±0,7	42,5±60,1	62,1±5,9	75,1±2,0	175,0±179,9	55,8±6,5	72,1±4,3
45	60,5±43,5	57,2±3,8	71,4±1,7	139,1±111,0	54,4±7,0	72,3±2,2	212,1±104,1	51,6±8,2	72,6±5,6
60	364,1±132,9	43,1±4,7	64,9±2,0	292,1±201,7	46,9±5,4	67,9±3,3	341,3±327,3	48,8±6,6	72,9±3,8
75	405,0±236,5	43,9±4,0	65,6±3,9	328,3±169,3	43,3±4,3	72,4±3,0	93,7±65,3	63,7±7,5	71,9±2,6
90	141,3±115,9	50,4±7,5	75,4±2,4	569,4±326,9	37,3±9,7	52,3 ± 76,6-	105,3±77,0	72,7±3,7	79,2±2,4
105	250,1±172,3	47,4±5,8	72,0±4,8	413,5±417,5	40,6±11,6	77,8±9,3	112,9±79,8	64,6±6,6	74,9±2,9
120	389,5±225,9	38,3±7,2	74,3±5,1	485,0±192,0	38,0±7,9	68,6±8,5	160,2±157,8	70,6±6,2	78,8±3,1
135	411,0±153,4	38,9±1,7	66,4±7,0	373,8±196,1	40,0±5,5	69,6±9,1	146,5±159,7	64,0±5,7	48,9±75,6
150	373,9±237,0	40,9±6,1	70,8±5,5	412,4±228,2	39,7±7,8	65,0±5,4	196,5±176,6	52,6±6,5	70,7±2,5
165	226,3±137,2	45,3±5,8	72,6±1,2	407,4±323,5	40,7±6,8	66,7±6,7			
180	404,0±171,2	38,3±5,4	68,5±4,9	198,0±103,7	46,4±4,1	71,3±5,7			
195	272,7±212,9	43,8±5,2	72,1±2,5						
210	300,7±189,0	45,8±9,6	67,5±4,4						
225	553,4±400,7	38,3±9,0	68,9±3,5						

Ventana de Refractancia			
Tiempo (min)	RW50	RW60	RW70
0			
15			
30			
45			
60			
75			
90			
105			
120			
135			
150			
165			
180			
195			
210			
225			

Figura 34: Color superficial de las muestras durante los procesos de secado de Ventana de Refractancia (RW50, RW60 y RW70)

### 13.6.8 Cambio de color ( $\Delta E$ )

Como se vio anteriormente con el proceso de secado ocurre cambio de color en todos al aplicar todo tipo de tratamiento de secado, en el secado por Ventana de Refractancia el tratamiento a 50°C (RW50) es de los que más cambio en las muestras se pudo calcular, los datos del cambio de color se pueden ver en la tabla 10 y en la Figura 34, donde se puede observar que el cambio de color aumenta en el tiempo hasta llegar a un pic, el cual se encuentra en el minuto 135, 90 y 60 para los secados RW50, RW60 y RW70, respectivamente, estos puntos coinciden con el inicio de la fase de secado con velocidad decreciente (Figura 22), se puede notar que a mayor temperatura el pic de cambio de color ocurre a menor tiempo. Luego de este punto el cambio de color disminuye para luego volver a aumentar en la etapa final del proceso de secado.

De los tres tratamientos, RW50 es el que mayor cambio de color produjo, esto puede ocurrir debido a que en este proceso la temperatura menor implica un mayor tiempo de proceso y como se mencionó luego del pic de mayor cambio, se genera una segunda alza en el cambio de color que aumenta con el tiempo, el cual es mayor en RW50.

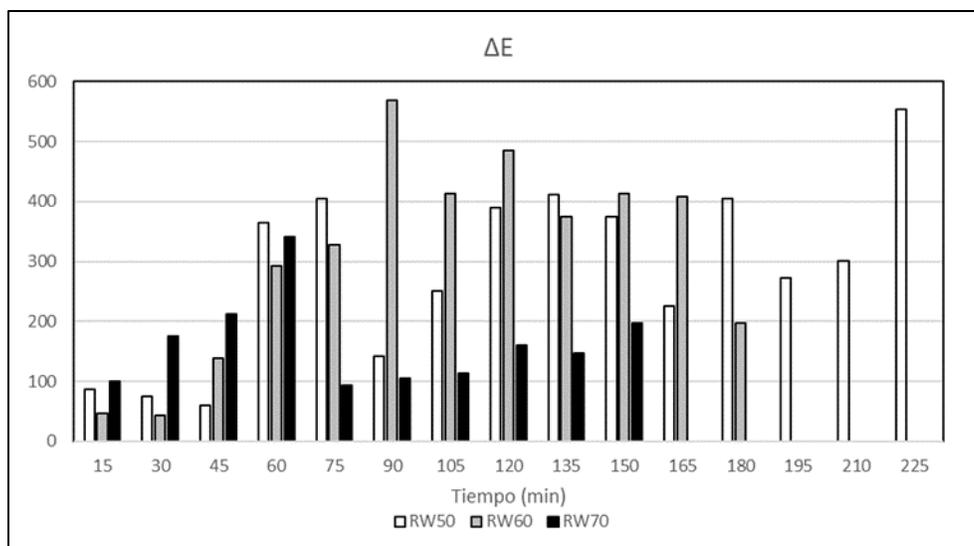


Figura 35:  $\Delta E$  calculado durante los procesos de secado por Ventana de Refractancia

### 13.6.9 Valor Croma (C\*)

Para las muestras iniciales del tiempo 0, antes de iniciado el proceso de secado, se tienen valores desde un rango entre 63-67 de valor croma calculado, rango de la saturación inicial de las muestras, en los tres tratamientos aplicados la saturación del color disminuye durante la primera hora de proceso, luego en RW50 y RW60 él se mantiene relativamente constante, en contraste, la saturación de las muestras de RW70 aumenta.

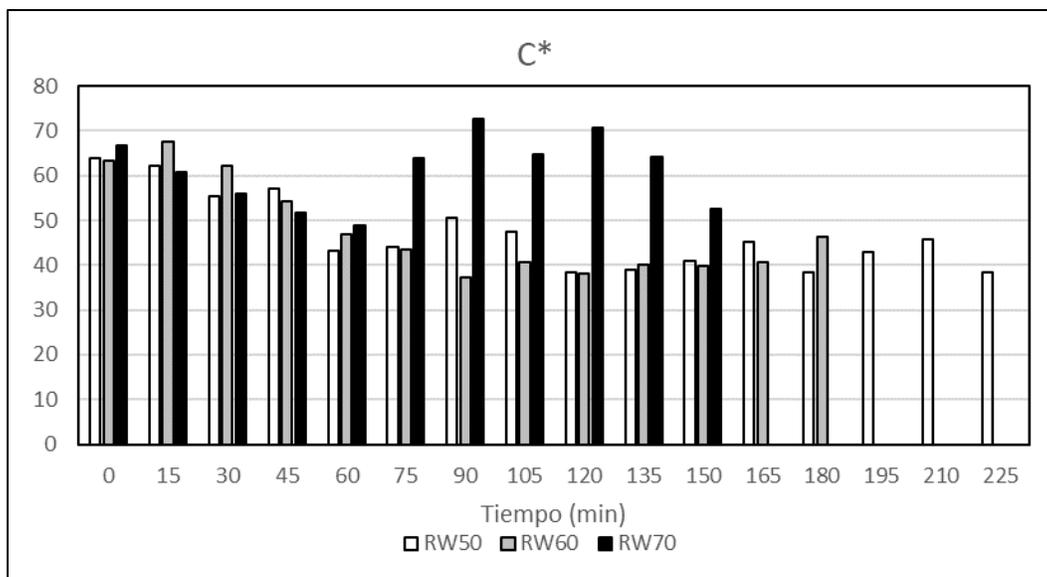


Figura 36: C\* de las muestras secadas por Ventana de Refractancia en el tiempo

### 13.6.8. Ángulo Hue (H°)

El ángulo Hue de las muestras durante el proceso de secado sufre una leve disminución en su valor, el resultado final de todos los secados de Ventana de Refractancia dan como resultado final un color de muestras de color amarillo.

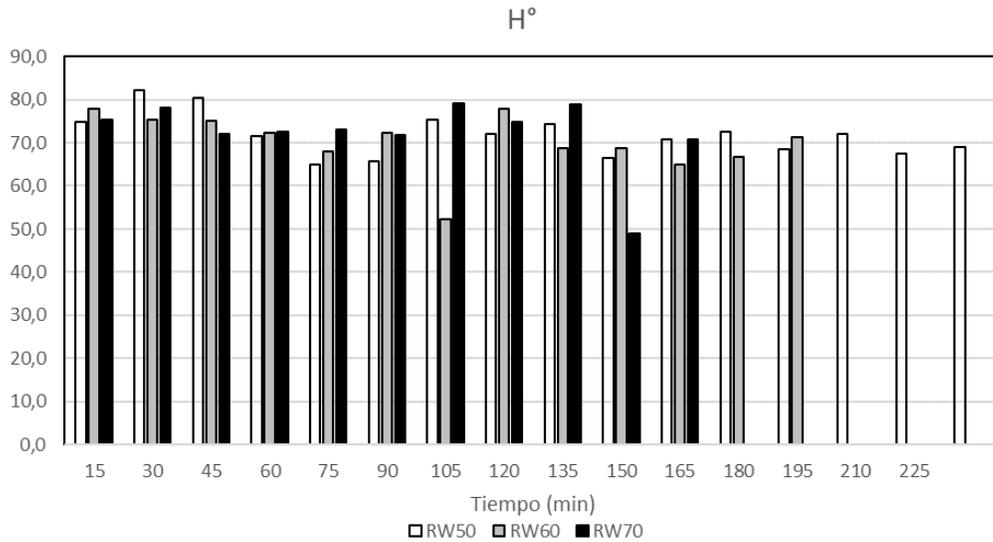


Figura 37: H° de las muestras secadas por Ventana de Refractancia en el tiempo

### 13.7. Calidad del producto seco

El color es el parámetro de calidad sensorial que se estudió en las muestras secas, éste se puede relacionar con el contenido de carotenoides del puré de Physales, ya que estos se encuentran en un alto contenido en la fruta fresca y son los pigmentos que le otorgan su color amarillo característico, por lo que se puede considerar que un menor cambio en los parámetros de color (pérdida de color amarillo) indica una menor degradación de los carotenoides, ya que el color está influenciado por los cambios químicos, bioquímicos, microbiológicos y físicos que se producen durante el proceso de secado y a que el color de un producto está asociado con el color del ingrediente fresco (Pathare et al., 2013).

Analizando el color final se puede observar que todas las muestras sufrieron un cambio en el color, en las muestras secas que mayor  $\Delta E$  se obtuvo fue en las procesadas por secados asistidos con luz infrarroja con una alta intensidad de luz y los menores  $\Delta E$  en las muestras se obtuvieron en aquellas que se secaron con procesos a 50°C, lo que concuerda con que a mayor temperatura se produce una

mayor degradación de carotenoides, excepto en los métodos de Ventana de Refractancia en los que a mayor temperatura se produce un menor cambio de color.

El color amarillo se puede ver en la coordenada positiva de  $b^*$  en los parámetros CIELAB, este parámetro puede dar una mejor relación de la medición con el contenido de carotenoides (pigmentos de color amarillo), todas las muestras secas presentaron un valor de  $b^*$  menor que la inicial, lo cual indica la degradación de carotenoides. De las muestras, HAD50; LRW70; IR50I; LRW60 son los que mejor retuvieron los pigmentos de color amarillo, esto por las bajas temperaturas utilizadas o en el caso de LRW70 por el poco tiempo de procesamiento.

El índice de pardeamiento es otro parámetro que se puede relacionar con la calidad de los productos secos, ya que este es un proceso que tiene efectos indeseados en el color, se puede decir que un producto seco con mejor calidad es aquel con un menor índice de pardeamiento, ya que son los que menos pigmentos de color café se forman en el proceso de secado. Los valores de BI menores se encontraron en las muestras de IR60I; IR70I, RW60; RW70 y IR50h, los cuales se destacan por el poco tiempo de procesamiento.

Para obtener un producto que pueda considerado de buena calidad en cuanto a retención de color y poca degradación de carotenoides de los productos secos de puré de *Physalis* se deben aplicar condiciones de secado de poco tiempo de proceso y temperaturas bajas, por lo que los procesos de IRI, IRm y RW son los ideales para un menor impacto en el color amarillo y un menor pardeamiento de las muestras.

### 13.8. Imágenes térmicas

La imagen térmica o termografía infrarroja es un método para medir de forma remota y sin contacto la temperatura de objetos o cuerpos, este método está basado en que todos los objetos con temperatura sobre 0°K (-273°C) emiten radiación electromagnética de la región infrarroja del espectro electromagnético (longitud de onda en el rango 0.75-1000  $\mu\text{m}$ ), la cual es detectada por un detector infrarrojo con la que se obtiene su temperatura (Bagavathiappan et al., 2013), la cámara infrarroja genera una imagen como muestra la Figura 38 , la cual entrega información del rango de temperatura en la imagen, temperatura del centro de la imagen, y la escala de colores de la radiación infrarroja detectada.

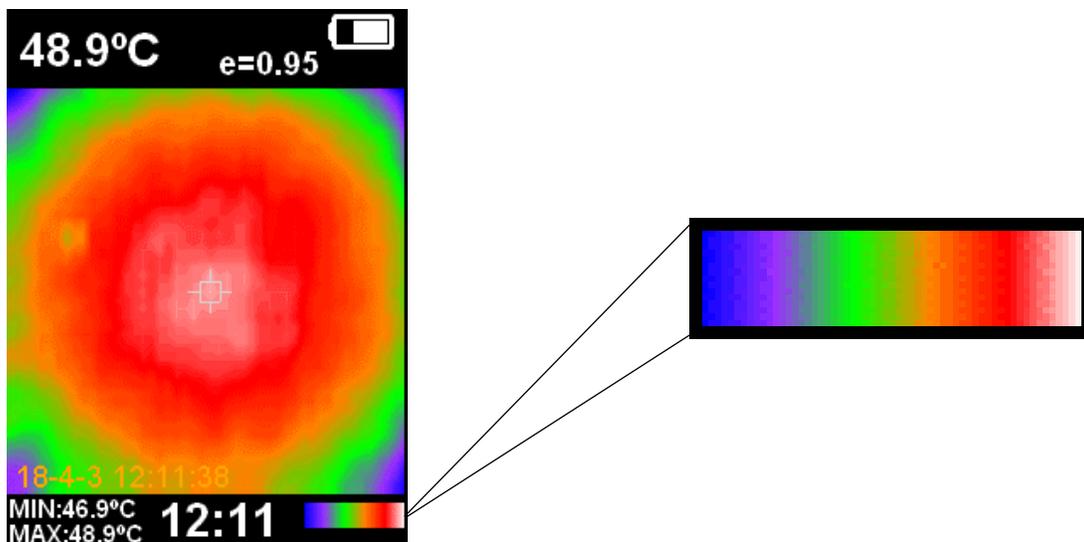


Figura 38: Ejemplo de imagen térmica de agua caliente en un baño termorregulado, con el detalle de la escala de colores de la radiación electromagnética detectada

Las imágenes térmicas tomadas durante los procesos de secado de Ventana de Refractancia a escala laboratorio (LRW) se encuentran en las figuras 33, 34 y 35, para 50, 60 y 70° respectivamente. En ellas se puede observar la evolución de la radiación emitida por las muestras en el proceso de secado, en todos los casos (LRW50, LRW60 y LRW70) las muestras a tiempo 0 muestran zonas de radiación azules y verdes, indicando que emiten menos radiación que el agua caliente ((a) en

Figura 39, Figura 40 y Figura 41) debido la muestra pasa por un tiempo de calentamiento en la que está absorbiendo la energía desde el agua caliente.

En los tres procesos de secado fotografiado con cámara infrarroja (LRW50, LRW60 y LRW70), el proceso de secado parte en el tiempo 0 con las muestras de puré de Physalis con una imagen térmica de color verde en su mayoría, en este tiempo las muestras pasan rápidamente de 2°C inicial a 41,8°C en LRW50, a 47,7°C en LRW60 y a 51,6°C en LRW70 en menos de 1 minuto después del contacto de las bandejas de Mylar® que contienen las muestras con el agua caliente, en este momento las muestras se encuentran en la fase de calentamiento del secado por lo que no emiten grandes cantidades de radiación electromagnética al ambiente y por el contrario se encuentran recibiendo energía calórica por radiación y conducción (causantes de su rápida alza de temperatura en su interior).

Luego de la fase de calentamiento, en el transcurso de los procesos de secado las imágenes de las muestras presentan gradualmente el aumento de zonas rojas, lo que indica el aumento de la emisión de radiación electromagnética desde las muestras, las zonas verdes y azules de aun presentes pueden corresponder a las zonas de las muestras que contienen humedad, estas zonas se presentan debido a que las bandejas de Mylar® se encuentran flotando en agua, la que a su vez está en movimiento en la bañó térmico, por lo que puede producir zonas con mayor concentración de agua, estas son las zonas en las que se está produciendo la transferencia de calor por radiación a las muestra. Con la disminución del contenido de la humedad, se disminuye la transferencia de calor por radiación y disminuyen las zonas verdes o azules de las imágenes y se aumentan las zonas rojas y aumenta la radiación electromagnética emitida por las muestras, las que están siendo calentadas solo por transferencia de calor por conducción.

Con las imágenes térmicas tomadas del proceso se puede identificar las zonas de las muestras con un mayor contenido de humedad, debido en estas se emite menor radiación electromagnética, en el caso del secado de Ventana de Refractancia,

estas zonas corresponden a las que se está produciendo la transferencia de calor por radiación y conducción en conjunto.

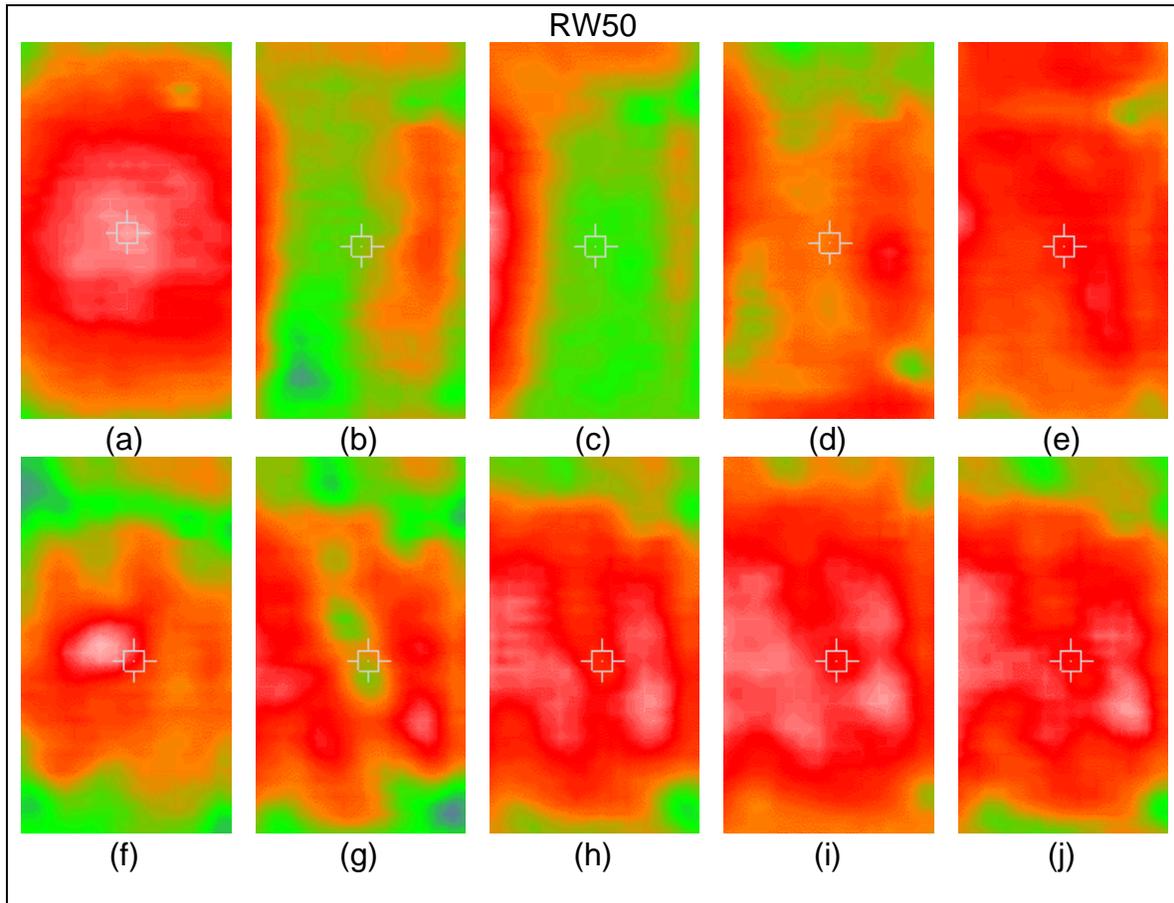


Figura 39: Imágenes térmicas tomadas durante el proceso de secado de LRW50, en donde (a) es la imagen del agua a 50°C, (b) es la imagen de las muestras en el tiempo 0 minutos y (c), (d), (e) (f), (g), (h), (i), (j) corresponde a la imagen a 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 minutos respectivamente.

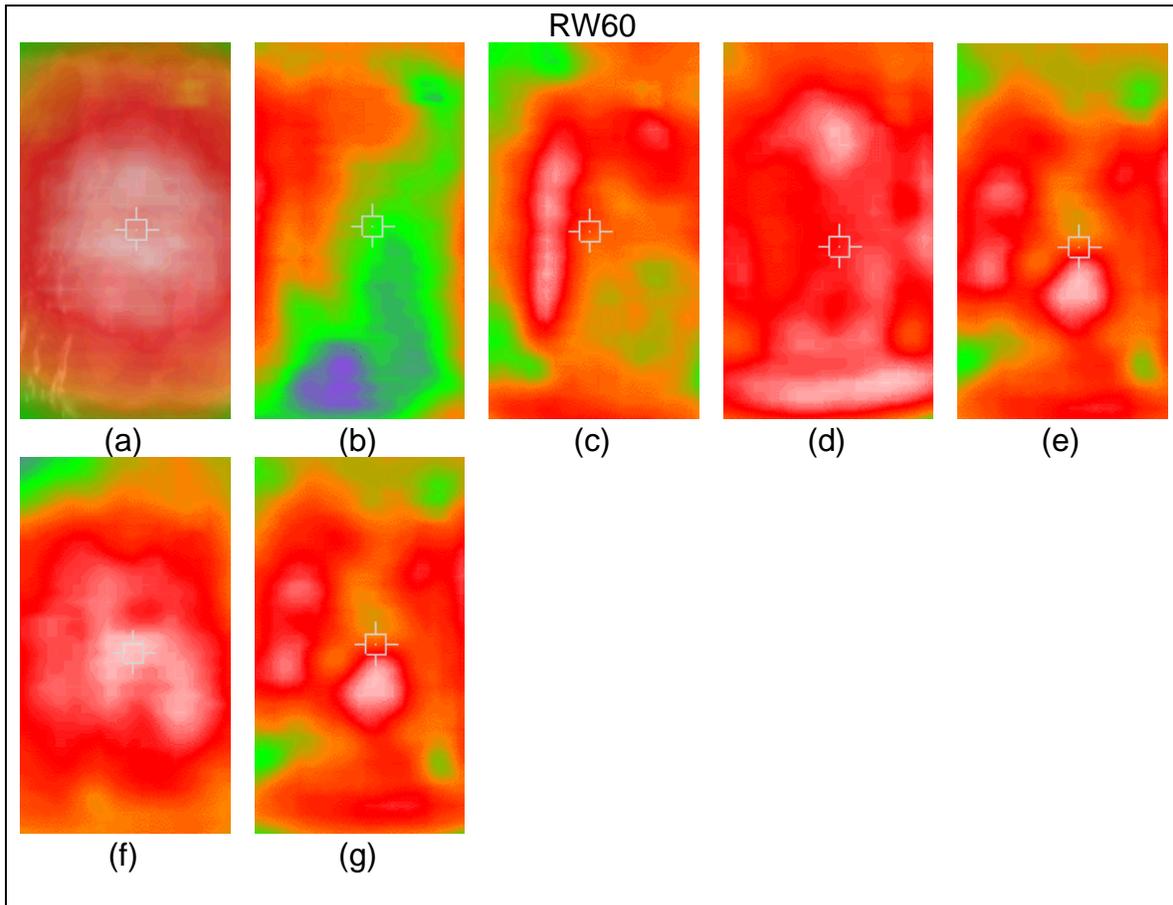


Figura 40: Imágenes térmicas tomadas durante el proceso de secado de LRW60, en donde (a) es la imagen del agua a 60°C, (b) es la imagen de las muestras en el tiempo 0 minutos y (c), (d), (e) (f) y, (g) corresponde a la imagen a 30, 60, 90, 120 y 150, respectivamente.

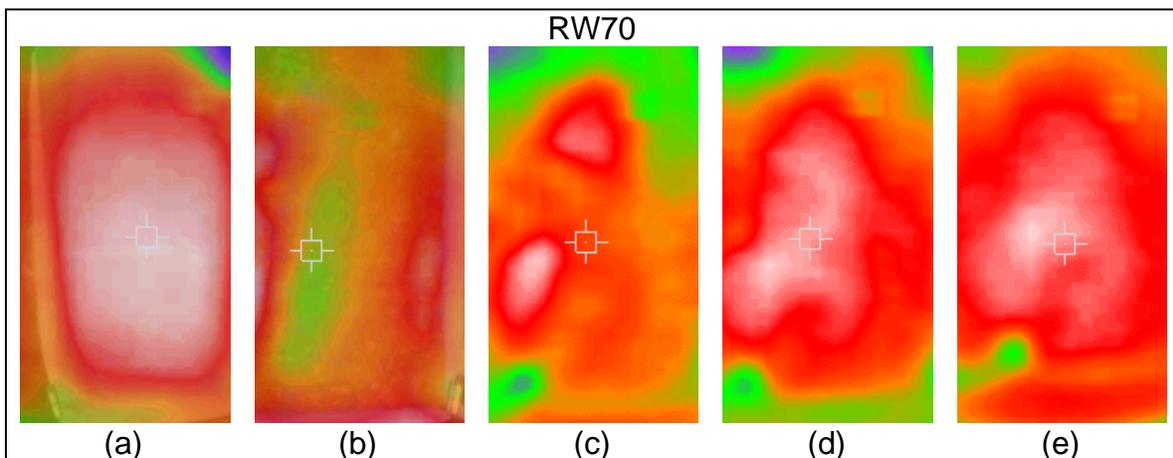


Figura 41: Imágenes térmicas tomadas durante el proceso de secado de LRW70, en donde (a) es la imagen del agua a 70°C, (b) es la imagen de las muestras en el tiempo 0 minutos y (c), (d), y (e) corresponde a la imagen a 30, 60 y 90, respectivamente.

### 13.8. Condiciones de secado del método de Ventana de Refractancia

Parámetro	Ventana de Refractancia		
	Temperatura (°C)		
	50	60	70
$D_{\text{eff}}$ ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )	5,447±0,7800	7,973±1,641	9,718±1,348
Tiempo predicho(min)	189,138	123,633	91,339
DE (%)	78,651±0,707	62,914±2,264	55,324±0,960
$\eta_e$ (%)	48,017±1,977	51,872±1,008	50,812±2,828
$\Delta E$	553,4±400,7	198,0±103,7	196,5±176,6
$\Delta C^*$	-25,5±10,0	-17,0±3,8	-14,2±8,3
$\Delta H^\circ$	-5,9±5,3	-6,7±5,4	-4,7±4,2

Para escoger las mejores condiciones de secado por Ventana de Refractancia se debe considerar el objetivo del proceso, si se quiere un proceso cuyo objetivo es un menor efecto en calidad, y como medida de esta se toma el efecto del proceso en el color superficial, se debe aplicar la un proceso en el cual las muestras tengan un menor tiempo de secado posible, por lo que en este caso es del proceso de Ventana de Refractancia a 70°C, pero este es el método con menor eficiencia de secado (DE) por lo que no es el método a considerar si el objetivo del proceso de secado es la disminución de humedad con una alta eficiencia de secado y eficiencia energética, para esto se debería realizar el proceso a 50°C. Un compromiso entre efecto en la calidad del producto, tiempo de proceso y eficiencia sería el proceso de RW60.

## 14. CONCLUSIÓN

- Se realizó el secado de puré de Physalis con el método de Ventana de Refractancia a tres temperaturas diferente (50, 60 y 70°) en dos tipos de equipo, uno de escala de laboratorio y un equipo de escala industrial de mayor capacidad, un método considerado como una novel technology en la industria alimentaria, con lo que se obtuvo un producto final similar a fruit leather con una baja humedad final. Además, el puré de Physalis fue secado con los métodos de aire convectivo y aire convectivo asistido con luz infrarroja para comparar los resultados con lo obtenido de Ventana de Refractancia.
- Se realizo las curvas de secado de la cinética de todos los procesos de secado realizados, en los que se determinó que Ventana de Refractancia (en sus dos equipos) presenta cinética y curvas de secado características del este proceso, y que RW es similar en cuando a velocidad y el tiempo de secado al secado por aire convectivo asistido con luz infrarroja baja (250 Watts).
- Se comparo las difusividad y energía de activación de los procesos de secado, se encontró que las de RW tiene valores comparables con HAD y IR de 250Watts, sus valores de  $D_{eff}$  son altos y de  $E_a$  son característicos de los procesos de secado.
- Se ajusto el proceso de secado a 5 tipos de modelos matemáticamente, los modelos de Newton, Henderson y Pabis, Page, Page modificado y Weibull, este último es el que logra un mejor ajuste para describir el secado de puré de Physalis con los métodos de Ventana de Refractancia, aire convectivo y aire convectivo asistido con luz infrarroja.
- Se mide el color superficial inicial y final de las muestras de puré de Physalis, con lo que se calculó el cambio de color, variación del valor Chroma y variación del ángulo Hue de estas, se obtuvo que las muestras procesadas con RW tenían efectos negativos en el color superficial final de las muestras

secas ( $\Delta E$  bajos, poca disminución de la saturación del color  $\Delta C^*$  y poco cambio en el ángulo Hue  $^\circ H$ ), mientras que los métodos con asistencia de IR presentaban mayores efectos, ya que la luz IR transmite la radiación directamente a esta superficie. Con todos los procesos se evolucionó desde un color inicial amarillo intenso con un tono rojizo con alta luminosidad a un producto seco de color naranja con un tono más rojizo, menos saturado y con poca luminosidad.

- Se comparo los valores de eficiencia de secado y eficiencia energética encontrados, para todos los métodos se obtuvieron valores altos de eficiencia de secado (DE mayores a 49%) y energética ( $\eta_e$  mayores a 48%), debido a que las muestras tenían un proceso de trituración en la preparación de las muestras. Los procesos de Ventana de Refractancia obtuvieron altos valores de eficiencia (LRW50 tiene DE de 88,6%, RW50 de 78,7%, LRW79 de 56,7% y RW70 de 55,32) pero no son mejores que los otros métodos de secado, su eficiencia se ve afectada por el alto consumo de energía térmica ( $EU_{ter}$ ) para realizar el proceso de secado.
- Para determinar las mejores condiciones del proceso de secado de puré de Physalis por Ventana de Refractancia se obtuvo que el proceso a 60°C es el proceso donde hay un de compromiso entre el efecto del proceso en la muestra con la eficiencia de secado del proceso. El proceso logra una mejor calidad final del producto al aplicar una alta temperatura y logra un tiempo de secado lo menor posible, pero este es un proceso con menor eficiencia de secado y energética.
- El secado de Ventana de Refractancia que logra reducir el contenido de humedad, el proceso tiene poco efecto negativo en el color superficial de las muestras, con bajo tiempo de secado y eficiencia de secado y energética moderadamente buena por sobre los 60°C. El método es eficaz para secar productos líquidos o semi- líquidos.

## 15. BIBLIOGRAFÍA

- Afolabi, T. J., Tunde-Akintunde, T. Y., & Adeyanju, J. A. (2015). Mathematical modeling of drying kinetics of untreated and pretreated cocoyam slices. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2731-2740.  
<https://doi.org/10.1007/s13197-014-1365-z>
- AOAC. (2000). *Official Method of Analysis* (17th ed., Vol. 2). Association of Official Analytical Chemists.
- Avalos-Llano, K. R., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2018). Effect of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut strawberries. *Food Chemistry*, 264, 393-400.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.028>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring – A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55.  
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Barbosa, J., Borges, S., Amorim, M., Pereira, M. J., Oliveira, A., Pintado, M. E., & Teixeira, P. (2015). Comparison of spray drying, freeze drying and convective hot air drying for the production of a probiotic orange powder. *Journal of Functional Foods*, 17, 340-351.  
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.001>
- Beigi, M. (2016). Energy efficiency and moisture diffusivity of apple slices during convective drying. *Food Science and Technology (Campinas)*, 36(1), 145-150. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.0068>

- Bennamoun, L., & Li, J. (2018). Drying Process of Food: Fundamental Aspects and Mathematical Modeling. En *Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes* (pp. 29-82). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811518-3.00002-8>
- Berk, Z. (2018a). Dehydration. En *Food Process Engineering and Technology* (pp. 513-566). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812018-7.00022-1>
- Berk, Z. (2018b). Heat and mass transfer, basic principles. En *Food Process Engineering and Technology* (pp. 79-126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812018-7.00003-8>
- Breslin, J. C. (2020). Drying. En *Breakfast Cereals and How They Are Made* (pp. 249-269). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812043-9.00012-6>
- Castro, A. M., Mayorga, E. Y., & Moreno, F. L. (2018). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152-167. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012>
- Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *LWT - Food Science and Technology*, 41(10), 2023-2028. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.002>
- Dehghannya, J., Pourahmad, M., Ghanbarzadeh, B., & Ghaffari, H. (2019). Heat and mass transfer enhancement during foam-mat drying process of lime juice: Impact of convective hot air temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 135, 30-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.023>
- Devahastin, S., & Niamnuy, C. (2010). Invited review: Modelling quality changes of fruits and vegetables during drying: a review: Modelling quality changes of

- fruits and vegetables. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(9), 1755-1767. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02352.x>
- Doymaz, İ. (2004). Drying kinetics of white mulberry. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 341-346. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00138-9)
- Doymaz, İ. (2015). Infrared Drying Kinetics and Quality Characteristics of Carrot Slices: Infrared Drying of Carrot Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2738-2745. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12524>
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- Farid, M. (2019). Heat and Mass Transfer in Food Processing. En *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (pp. 439-460). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814803-7.00017-8>
- Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H., & Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 557-563. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.020>
- İzli, N., Yıldız, G., Ünal, H., Işık, E., & Uylaşer, V. (2014). Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of Goldenberry ( *Physalis peruviana* L.). *International Journal of Food Science & Technology*, 49(1), 9-17. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12266>
- Jaeger, H., Janositz, A., & Knorr, D. (2010). The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies. *Pathologie Biologie*, 58(3), 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.patbio.2009.09.016>

- Jensen, F. (1985). Activation energies and the arrhenius equation. *Quality and Reliability Engineering International*, 1(1), 13-17.  
<https://doi.org/10.1002/qre.4680010104>
- Junqueira, J. R. de J., Corrêa, J. L. G., de Oliveira, H. M., Ivo Soares Avelar, R., & Salles Pio, L. A. (2017). Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. *LWT - Food Science and Technology*, 82, 404-410. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.072>
- Karthikeyan, A. K., & Murugavelh, S. (2018). Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer. *Renewable Energy*, 128, 305-312.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.061>
- Kerr, W. L. (2013). Food Drying and Evaporation Processing Operations. En *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (pp. 317-354). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00012-4>
- Kerr, W. L. (2019). Food Drying and Evaporation Processing Operations. En *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (pp. 353-387). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814803-7.00014-2>
- Kyriacou, M. C., & Roupael, Y. (2018). Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 234, 463-469.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.046>
- Lopez, J., Vega-Gálvez, A., Torres, M. J., Lemus-Mondaca, R., Quispe-Fuentes, I., & Di Scala, K. (2013). Effect of dehydration temperature on physico-chemical properties and antioxidant capacity of goldenberry (*Physalis*

peruviana L.). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(3), 293-300.

<https://doi.org/10.4067/S0718-58392013000300013>

Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>

Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., & Tiwari, B. K. (2014). Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 6(3), 43-55. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>

Motevali, A., Minaei, S., Banakar, A., Ghobadian, B., & Khoshtaghaza, M. H. (2014). Comparison of energy parameters in various dryers. *Energy Conversion and Management*, 87, 711-725. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.012>

Muñoz-López, C., Urrea-García, G. R., Jiménez-Fernández, M., Rodríguez-Jiménez, G. del C., & Luna-Solano, G. (2018). Effect of drying methods on the physicochemical and thermal properties of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). *CyTA - Journal of Food*, 16(1), 127-134. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1345984>

Nielsen, S. S. (Ed.). (2010). *Food analysis* (Chapter 32 Color Analysis; 4th ed). Springer.

Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology*, 25(1), 37-48. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>

- Nindo, C. I., Tang, J., Powers, J. R., & Bolland, K. (2004). Energy consumption during Refractance Window® evaporation of selected berry juices. *International Journal of Energy Research*, 28(12), 1089-1100.  
<https://doi.org/10.1002/er.1017>
- Nocetti, D., Núñez, H., Puente, L., Espinosa, A., & Romero, F. (2020). Composition and biological effects of goldenberry byproducts: An overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(12), 4335-4346.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.10386>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*, 241, 75-87.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008>
- Palou, E., Lopez-Malo, A., Barbosa-Canovas, G. V., Welti-Chanes, J., & Swanson, B. G. (1999). Polyphenoloxidase Activity and Color of Blanched and High Hydrostatic Pressure Treated Banana Puree. *Journal of Food Science*, 64(1), 42-45. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb09857.x>
- Pan, Z., Atungulu, G. G., & Li, X. (2014). Infrared Heating. En *Emerging Technologies for Food Processing* (pp. 461-474). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411479-1.00025-5>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Pavan, M. A., Schmidt, S. J., & Feng, H. (2012). Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air

- dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. *LWT - Food Science and Technology*, 48(1), 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.024>
- Pavón-Melendez, G. (2002). Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying. *Journal of Food Engineering*, 51(4), 347-353. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00077-2)
- Phillip., T. C. (2004). REFRACTANCE WINDOW TM - "DOWN UNDER. *roc. 2004 IDS 14th Int. Drying Symposium*.
- Puente, L. A., Pinto-Muñoz, C. A., Castro, E. S., & Cortés, M. (2011). Physalis peruviana Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International*, 44(7), 1733-1740. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Purlis, E., & Salvadori, V. O. (2009). Modelling the browning of bread during baking. *Food Research International*, 42(7), 865-870. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.007>
- Raghavi, L. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2018). Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 222, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032>
- Ramadan, M. F. (2011). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Research International*, 44(7), 1830-1836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042>
- Rastogi, N. K. (2012). Infrared Heating of Fluid Foods. En *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods* (pp. 411-432). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00013-X>

- Sabarez, H. T. (2015). Modelling of drying processes for food materials. En *Modeling Food Processing Operations* (pp. 95-127). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-284-6.00004-0>
- Sadeghi, E., Movagharnejad, K., & Haghghi Asl, A. (2019). Mathematical modeling of infrared radiation thin-layer drying of pumpkin samples under natural and forced convection. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12).  
<https://doi.org/10.1111/jfpp.14229>
- Salehi, F., & Kashaninejad, M. (2018). Modeling of moisture loss kinetics and color changes in the surface of lemon slice during the combined infrared-vacuum drying. *Information Processing in Agriculture*, 5(4), 516-523.  
<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.006>
- Shende, D., & Datta, A. K. (2019). Refractance window drying of fruits and vegetables: A review: Refractance window drying of fruits and vegetables: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1449-1456.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.9356>
- Torki-Harchegani, M., Ghanbarian, D., Maghsoodi, V., & Moheb, A. (2017). Infrared thin layer drying of saffron ( *Crocus sativus* L.) stigmas: Mass transfer parameters and quality assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.09.005>
- Trimigno, A., Marincola, F. C., Dellarosa, N., Picone, G., & Laghi, L. (2015). Definition of food quality by NMR-based foodomics. *Current Opinion in Food Science*, 4, 99-104. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.06.008>
- Valdenegro, M., Fuentes, L., Herrera, R., & Moya-León, M. A. (2012). Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry

(*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 67, 110-117.

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.12.021>

Vásquez-Parra, J. E., Ochoa-Martínez, C. I., & Bustos-Parra, M. (2013). Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Journal of Food Engineering*, 119(3), 648-654. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.037>

Yam, K. L., & Papadakis, S. E. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 137-142. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00195-X)

Zhang, Q.-A., Song, Y., Wang, X., Zhao, W.-Q., & Fan, X.-H. (2016). Mathematical modeling of debittered apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels during thin-layer drying. *CyTA - Journal of Food*, 14(4), 509-517. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1136843>

Zheng, C., He, H.-J., & Sun, D.-W. (2016). Object Measurement Methods. En *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation* (pp. 65-85). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802232-0.00003-7>

Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2015). Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. *Food Research International*, 69, 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>