

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS



Estudio de la formulación de un prototipo de bebida proteica saludable a partir de suero de leche con jugo y pomasa de manzana deshidratada por secado de ventana de refractancia

Tesis presentada a la Universidad de Chile para optar al grado de Magíster en Alimentos mención Gestión, Calidad e Inocuidad de los Alimentos y Memoria para optar al Título de Ingeniero en Alimentos por:

Claudio Cesar Vega Cartes

Firma manuscrita en negro de Dra. Cielo Char Aubry.

Dra. Cielo Char Aubry

Directores de Tesis:

Firma manuscrita en azul de Dr. Luis Puente Díaz.

Dr. Luis Puente Díaz

Santiago - Chile

Mayo 2024

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS

INFORME DE APROBACIÓN DE TESIS DE MAGÍSTER

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

Claudio Cesar Vega Cartes

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluadora de Tesis como requisito para optar al grado de Magíster en Alimentos mención Gestión, Calidad e Inocuidad de los Alimentos en el examen público rendido el día _____

Directora de Tesis:

Dra. Cielo Char Aubry

Co-director de Tesis:

Dr. Luis Puente Díaz

Comisión Evaluadora de Tesis:

Dra. Vilbett Briones Labarca

Dra. Paula Jiménez Patiño

Dr. Roberto Lemus Mondaca

DEDICATORIA

*[...] Del bello bosque en sombra he de partir
porque tengo promesas que cumplir
y muchas millas antes de dormir
y muchas millas antes de dormir.*

- Robert Frost

Dedicado a Myriam C., Claudio V., Catalina V. y Matías V.

AGRADECIMIENTOS

En este capítulo de gratitud quiero agradecer a mis directores de tesis, Cielo C. y Luis P., gracias por su guía, sabiduría compartida, paciencia inagotable, compromiso constante y ser faros en mi travesía académica, además, gracias a los profesores de mi comisión, Vilbett B., Paula J., y Roberto L. junto con los que me formaron desde el pregrado, Natalia H., Pedro A., Santiago Z., Sergio L., Jacqueline P., Viviana P., Edwar F., Antonio Z., Claudia Y., German G., Hernan P., María Angelica V., Alicia R., Jaime O., Claudio I., Nalda R., Paz R., José R., Christel F., Maria Angelica L. y Lilian A. por el sudor, las lágrimas, sueños, años y daños de inversión puestos al trabajo de la docencia y la investigación. A Alejandro B. y Francisca M., por hacer posible gestiones esenciales en la comunidad de FCQYF. También gracias a la profesora Andrea B., por recomendar mi admisión a este programa enlace, a mi compañera Constanza D. por tomarse el tiempo de conocerme y a mi mascota Jack por cada paso que dimos siguiendo su nariz de linterna. Están vivos en mis recuerdos. A la familia Lab. de Ciencias de los Alimentos, Helem, Alfredo y Juan C. por realizar labores vitales del proceso. A la Universidad de Chile por fomentar un ambiente sano, donde disfrute Corridas de Aniversario y Juegos Olímpicos Estudiantiles. A los artistas, por transformar y/o educar al mundo a través de la música y los libros. A mis amistades del Liceo, Andrés S., Gabriel E. y Gustavo R. por cada risa compartida, apoyo y compañía. A mi amigo de la universidad Francisco O. por ser mi compañero de desafíos. A mi familia, Myriam C., Claudio V., Catalina V. y Matías V. por celebrar mis alegrías. Gracias por ser el corazón que late en cada logro. Finalmente, a mí mismo, gracias por la resiliencia y el esfuerzo constante. El camino continúa, pero llevo conmigo el eco de cada momento. A todos los momentos compartidos, *Gracias*

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
TABLA DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE ECUACIONES	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Suero de leche	1
1.1.1. Composición química del suero de leche dulce/ ácido	2
1.1.2. Propiedades de las proteínas del suero de leche	4
1.1.3. Efecto de los BCAA sobre el músculo esquelético	6
1.1.4. Producción mundial y chilena de suero de leche	8
1.2. Manzana (<i>Malus domestica</i>)	10
1.2.1. Compuestos fenólicos en manzana	12
1.2.2. Pomasa de manzana	13
1.2.3. Actividad prebiótica	16
1.2.4. Producción mundial y chilena de manzana	18
1.3. Antimicrobianos naturales	20
1.3.1. Canela (<i>Cinnamomum spp.</i>)	21
1.4. Secado	22
1.4.1. Secado de Ventana de Refractancia (RW)	23
1.4.2. Curvas de secado	26
1.4.3. Modelamiento matemático del proceso de secado	28
1.4.4. Análisis estadístico de los modelos matemáticos de secado	31
2. HIPÓTESIS	32
3. OBJETIVOS	33
3.1. Objetivo general	33
3.2. Objetivos específicos	33
4. METODOLOGÍA	34
4.1. Obtención de materias primas	35

4.1.1. Suero de leche	35
4.1.2. Extracción de subproductos de manzana (jugo, pomasa, descartes)	35
4.1.3. Emulsificación del Cinamaldehído	36
4.2. Caracterización de las materias primas	36
4.3. Secado en capa fina de pomasa de manzana	37
4.3.1. Determinación de la humedad inicial (H_0)	37
4.3.2. Deshidratación de pomasa de manzana	37
4.3.3. Cálculo de la razón de humedad (MR)	38
4.3.4. Construcción de cinéticas de secado RW	39
4.3.5. Cálculo de difusividades efectivas ($Deff$)	39
4.3.6. Cálculo de energía de activación (Ea)	39
4.3.7. Modelamiento matemático de las cinéticas de secado	40
4.4. Molienda y tamizado	41
4.5. Medición de color	42
4.6. Determinación de compuestos bioactivos	42
4.6.1 Determinación del contenido de polifenoles totales	43
4.6.2 Determinación de la capacidad antioxidante total	43
4.7. Diseño de formulaciones de bebidas proteicas saludables	44
4.9. Caracterización de las formulaciones de bebidas lácteas	45
4.9.1. Determinación de color de las formulaciones de bebidas	45
4.9.2. Determinación de pH	46
4.9.3. Determinación del contenido de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix)	46
4.9.4. Determinación de contenido de polifenoles totales	46
4.9.5. Determinación de capacidad antioxidante total	46
4.9.6. Determinación de contenido de proteínas	46
4.10. Optimizaciones de las variables de respuesta	47
4.11. Procedimiento del etiquetado nutricional según RSA y ley 20.606	48
4.12. Análisis estadísticos	48
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1. Obtención y caracterización de las materias primas	49
5.1.1. Balances de materia	49
5.2. Caracterización de materias primas	51
5.3. Secado en capa fina de la pomasa de manzana por RW70, RW80 y RW90	54

5.3.1. Curvas de secado RW	54
5.3.2. Análisis de velocidades de secado RWS	56
5.3.3. Análisis del perfil de temperaturas RWT	58
5.3.4. Difusividad efectiva y energía de activación	61
5.3.5. Modelamiento matemático de las curvas de secado RW	63
5.3.6. Análisis gráfico de los modelos matemáticos ajustados	67
5.3.7. Análisis estadístico de los modelos matemáticos ajustados	69
5.4. Tamizado de polvo de manzana seco	71
5.5. Resultados de color en muestras de pomasa de manzana Royal Gala	72
5.5.1. Parámetros de color superficial L^* , a^* , b^* , ΔE	72
5.5.2. Índice de pardeamiento e índice de blancura	74
5.6. Compuestos bioactivos de pomasa de manzana	75
5.7. Caracterización de las formulaciones de bebidas lácteas	77
5.7.1. Apariencia	77
5.7.2. Color mediante análisis de imágenes	78
5.7.3. pH	81
5.7.3.1. Ecuación de efectos estandarizados para pH	83
5.7.4. Sólidos solubles	84
5.7.4.1. Ecuación de efectos estandarizados para sólidos solubles	86
5.7.5. Polifenoles	87
5.7.5.1. Ecuación de efectos estandarizados para polifenoles	88
5.7.6. Capacidad antioxidante	87
5.7.6.1. Ecuación de efectos estandarizados para capacidad antioxidante	91
5.7.7. Proteínas	92
5.7.7.1. Ecuación de efectos estandarizados para proteínas	94
5.8. Optimización mediante metodología por superficie de respuesta	95
5.8.1. Optimización de las variables de respuesta	96
5.8.2. Optimización de múltiples variables de respuesta	99
5.9. Verificación del modelo de optimización	99
5.10. Etiquetado nutricional del producto	101
6. CONCLUSIONES	102
7. ESTUDIOS FUTUROS	104
8. BIBLIOGRAFÍA	105
9. ANEXOS	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química comparativa de suero de leche dulce/ ácido	3
Tabla 2. Características térmicas de la fracción de proteínas del suero	4
Tabla 3. Contenido aminoacídico de la proteína de suero de leche	6
Tabla 4. Compuestos fenólicos en la pomasa de manzana	15
Tabla 5. Modelos matemáticos aplicados en secados de capa fina	30
Tabla 6. Modelos matemáticos de secado utilizados experimentalmente	40
Tabla 7. Composición de las formulaciones de bebidas proteicas	45
Tabla 8. Diseño de experimentos para bebidas lácteas	47
Tabla 9. Resultados de la caracterización de materias primas	51
Tabla 10. Resultados de difusividad efectiva y energía de activación	61
Tabla 11. Parámetros cinéticos de los modelos matemáticos ajustados	63
Tabla 12. Valores estadísticos y de error óptimos R^2 , χ^2 y RMSE	69
Tabla 13. Resultados de los parámetros de color L^* , a^* , b^* , ΔE	72
Tabla 14. Índices de pardeamiento y de blancura	74
Tabla 15. Contenido de los compuestos bioactivos.	75
Tabla 16. Resultados de parámetros L^* , a^* , b^* , C^* , H° de formulaciones	78
Tabla 17. Resumen análisis estadístico de diseño de experimentos individuales	95
Tabla 18. Valores optimizados para cada variable respuesta y su validación	99
Tabla 19. Etiquetado nutricional del producto	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción mundial de suero de leche líquido entre 2010 y 2020	9
Figura 2. Producción chilena de suero de leche líquido entre 2018 y 2021	10
Figura 3. Subproductos químicos de manzana	12
Figura 4. Subproductos a partir del procesamiento de manzana	14
Figura 5. Producción mundial de manzanas entre 2019 y 2023	19
Figura 6. Producción y exportación chilena de manzanas entre 2019 y 2023	20
Figura 7. Transferencia de energía térmica en el sistema de secado RW	24
Figura 8. Sistema de alta y baja transferencia térmica por RW	25
Figura 9. Curva típica de secado en alimentos	28
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de estudio de formulación	34
Figura 11. Configuración experimental del secado RW	38
Figura 12. Balance de masa de materias primas	49
Figura 13. Curvas de secado RW de pomasa de manzana	54
Figura 14. Curvas de velocidades de secado RWS a distintas temperaturas	56
Figura 15. Curvas del perfil de temperaturas RWT en pomasa de manzana	58
Figura 16. Curvas de simulación para RW70	67
Figura 17. Curvas de simulación para RW80	68
Figura 18. Curvas de simulación para RW90	68
Figura 19. Balance de masa de pomasa de manzana deshidratada y tamizada	71
Figura 20. Bebidas F1-F9 posterior almacenamiento 24 horas/ 4°C	77
Figura 21. pH de bebidas proteicas saludables	81
Figura 22. Diagrama de Pareto para pH	83
Figura 23. Sólidos solubles de bebidas proteicas saludables	84
Figura 24. Diagrama de Pareto para sólidos solubles	86
Figura 25. Contenido de polifenoles de bebidas proteicas saludables	87
Figura 26. Diagrama de Pareto para contenido de polifenoles totales	88
Figura 27. Capacidad antioxidante de formulaciones	89
Figura 28. Diagrama de Pareto para capacidad antioxidante total	91

Figura 29. Contenido de proteínas de bebidas proteicas saludables	92
Figura 30. Diagrama de Pareto para proteínas	94
Figura 31. Superficies de respuestas para bebidas lácteas	98
Figura 32. Superficie de respuesta para discapacidad múltiple	99

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Rendimiento de separación ($\% R_{separación}$)	35
Ecuación 2. Rendimiento de extracción ($\% R_{extracción}$)	36
Ecuación 3. Humedad inicial (H_0)	37
Ecuación 4. Razón de Humedad (MR)	38
Ecuación 5. Forma lineal de la segunda ley de Fick	39
Ecuación 6. Forma lineal de la ecuación de Arrhenius	39
Ecuación 7. Cinética del modelo matemático de Newton/ Lewis	40
Ecuación 8. Cinética del modelo matemático de Henderson y Pabis	40
Ecuación 9. Cinética del modelo matemático de Page	40
Ecuación 10. Cinética del modelo matemático de Page Modificado	40
Ecuación 11. Cinética del modelo matemático de Weibull	40
Ecuación 12. Coeficiente de determinación (R^2)	41
Ecuación 13. Valor chi-cuadrado (χ^2)	41
Ecuación 14. Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	41
Ecuación 15. Superficie de partícula esférica (X_s)	42
Ecuación 16. Volumen de partícula esférica (X_v)	42
Ecuación 17. Cambio de color (ΔE)	42
Ecuación 18. Índice de pardeamiento (BI)	42
Ecuación 19. Índice de blancura (WI)	42
Ecuación 20. Polifenoles totales expresado en base seca	43
Ecuación 21. Capacidad antioxidante expresado en base seca	44
Ecuación 22. Fórmula pomasa de manzana ($\%m/v$)	44
Ecuación 23. Fórmula mezcla de bebida ($\%v/v$)	44
Ecuación 24. Valor Chroma (C^*)	46
Ecuación 25. Ángulo Hue (H°)	46
Ecuación 26. Ecuación de regresión para pH	84
Ecuación 27. Ecuación de regresión para sólidos solubles	86
Ecuación 28. Ecuación de regresión para contenido de polifenoles totales	89
Ecuación 29. Ecuación de regresión para capacidad antioxidante total	91
Ecuación 30. Ecuación de regresión para proteínas	94

RESUMEN

Estudio de la formulación de un prototipo de bebida proteica saludable a partir de suero de leche con jugo y pomasa de manzana deshidratada por secado de ventana de refractancia

El presente trabajo de tesis muestra el estudio de la formulación de un prototipo de bebida láctea con buena fuente de proteínas y aporte de polifenoles, provenientes de la manzana 'Royal Gala'. El objetivo de esta tesis fue estudiar la formulación de un prototipo de bebida proteica saludable alta en antioxidantes utilizando subproductos agroindustriales como el suero de leche y la pomasa de manzana deshidratada por secado de ventana de refractancia (RW), saborizada con jugo de manzana natural y una emulsión de cinamaldehído. La metodología comprendió la obtención y caracterización de materias primas, el secado de pomasa de manzana por RW, molienda y tamizado, evaluación estadística de modelos matemáticos, medición de color y compuestos bioactivos, diseño de formulaciones de mezcla de suero de leche + jugo de manzana, y pomasa de manzana con concentraciones fijas de concentrado de proteína de suero y emulsión de cinamaldehído, la homogeneización a alta velocidad y la caracterización y optimización de las formulaciones. Los resultados muestran que el modelo de Weibull tiene la mayor bondad de ajuste para los tratamientos aplicados, además muestran que el tratamiento RW80 presentó mejores valores en los parámetros de color, índice de pardeamiento y contenido de polifenoles, por lo que se seleccionó este tratamiento de secado para la pomasa de manzana. Finalmente, los resultados muestran que la combinación óptima de los factores experimentales es una mezcla de 31,47% jugo manzana + 68,53% suero de leche, con un contenido de 2,5% de pomasa de manzana deshidratada y que esta combinación permite alcanzar la máxima eficiencia nutricional en la bebida láctea.

ABSTRACT

Study of the formulation of a prototype of a healthy protein drink from whey with juice and apple pomace dehydrated by refractance window drying

The present thesis work shows the study of the formulation of a prototype of a dairy drink with a good source of proteins and contribution of polyphenols, coming from the 'Royal Gala' apple. The objective of this thesis was to study the formulation of a prototype of a healthy protein drink high in antioxidants using agroindustrial byproducts such as whey and apple pomace dehydrated by refractance window (RW) drying, flavored with natural apple juice and a cinnamaldehyde emulsion. The methodology included the obtaining and characterization of raw materials, drying of apple pomace by RW, grinding and sieving, statistical evaluation of mathematical models, measurement of color and bioactive compounds, design of formulations of whey + apple juice mixture, and apple pomace with fixed concentrations of whey protein concentrate and cinnamaldehyde emulsion, high-speed homogenization and characterization and optimization of the formulations. The results show that the Weibull model has the greatest goodness of fit for the applied treatments, and they also show that the RW80 treatment presents better values in the parameters of color, browning index and polyphenol content, which is why this treatment was selected. drying for the apple pomace. Finally, the results show that the optimal combination of experimental factors is a mixture of 31.47% apple juice + 68.53% whey, with a content of 2.5% dehydrated apple pomace and that this combination allows achieving maximum nutritional efficiency in the dairy drink.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Suero de leche

El suero de leche se define como un subproducto lácteo que se obtiene durante la elaboración del queso tras la separación de la caseína y la grasa durante la coagulación de la leche mediante la acción ácida o de enzimas del tipo cuajo (por ejemplo, renina, enzima digestiva de los rumiantes). Generalmente se utiliza ácido cítrico y algunas veces cuajo y pocas veces lactasa para la coagulación. Esta coagulación rompe el sistema coloidal de la leche en dos fracciones, una fracción sólida correspondiente a aquella fracción que constituye y/o forma parte del queso, compuesta principalmente por proteínas insolubles y lípidos, las cuales en su proceso de precipitación arrastran y atrapan minoritariamente algunos de los constituyentes hidrosolubles, y una fracción líquida correspondiente al suero de leche, en cuyo interior se encuentran suspendidos todos los otros componentes nutricionales que no fueron integrados a la coagulación de la caseína (Poveda, 2013).

El suero de leche es un líquido de color amarillento verdoso considerado hasta hace poco uno de los principales problemas de eliminación en la industria láctea. Este color amarillento verdoso está relacionado con cantidades de riboflavina o vitamina B2 (22,2-39,6 mg/kg), presentes en su composición. El suero de leche comprende entre el 80% al 90% del volumen total de la leche y contiene entre el 50% al 55% de los nutrientes de la leche original, tales como son la lactosa, proteínas de suero, minerales y vitaminas. El contenido de grasa del suero es bajo y el contenido de caseína, que forma la cuajada de queso, es insignificante. Las sales de calcio (Ca^{2+}),

potasio (K^+), sodio (Na^+), y fósforo (P) constituyen la mayor parte de los minerales que lo conforman (Barukčić et al., 2018; Mavropoulou & Kosikowski, 1973).

Dependiendo del tipo de coagulación existen dos tipos de suero de leche, el suero dulce, que se obtiene después de la coagulación enzimática de la leche, y el suero ácido proveniente de la coagulación de la leche mediante acidificación. La composición, y también las características sensoriales del suero varían según el tipo de suero (ácido o dulce), la fuente de la leche (vaca, oveja, cabra, búfalo, etc.), la alimentación del animal que produjo la leche, el procesamiento del queso utilizado, la época del año y la etapa de lactancia. Pero la composición química del suero varía principalmente en relación con el método utilizado para su producción. El suero dulce se obtiene mediante la coagulación enzimática de las caseínas al pH fisiológico de la leche (pH= 6,5 a 6,8), utilizando enzima coagulante (cuajo). El suero ácido es menos adecuado para el procesamiento que su equivalente dulce, debido a su bajo pH y su mayor concentración de minerales, que hacen que su manejo sea problemático, especialmente para las pequeñas industrias lácteas. Este manejo problemático debido a las dificultades para acceder a tecnologías apropiadas para su manejo y procesamiento produce que la mayor parte del suero producido sea descartado principalmente, además del desconocimiento del alto valor nutricional que poseen algunas queseras artesanales de este subproducto lácteo (Barukčić et al., 2018; Poveda, 2013; Skryplonek et al., 2019).

1.1.1. Composición química del suero de leche dulce/ ácido

El suero de leche está constituido por los nutrientes mayoritarios originales de la leche. Estos corresponden a un contenido de 4,5% de lactosa, 0,8% - 1,0% de

proteínas totales y 0,05% de grasa en el caso del suero dulce. Mientras que la composición química del suero ácido es muy parecida al suero dulce, sin embargo, el suero ácido posee un mayor contenido de ácido láctico y menor pH ($\text{pH} < 5,6$). La siguiente Tabla 1 muestra la composición química comparativa del suero de leche dulce/ ácido.

Tabla 1. Composición química comparativa de suero de leche dulce/ ácido.

Componente	Suero dulce	Suero ácido	Suero dulce	Suero ácido
Sólidos totales (%)	6,0	6,4	6,5	6,5
Agua (%)	94	93,6	93-94	94-95
Grasa (%)	0,05	0,05	-	-
Proteínas totales (%)	0,8	0,8	0,8-1,0	0,8-1,0
Proteínas de suero (%)	0,60	0,60	0,60-0,65	0,60-0,65
Lactosa (%)	4,5	4,6	-	.
Minerales (%)	0,5	0,8	0,5-0,7	0,5-0,7
Ácido cítrico (%)	-	-	0,1	0,1
Ácido láctico (%)	0,05	0,40	-	-
pH	-	-	6,2-6,4	4,6-5,0
Acidez titulable	-	-	4	20-25
Referencia	Barukčić et al. (2018)		Tsakali et al., (2010)	

La Tabla 1 muestra que la composición mineral posee las mayores variaciones entre los dos tipos de suero de acuerdo a lo reportado por Barukčić et al. (2018), junto con el pH y el contenido de ácido láctico. Además, muestra que la lactosa, aparte del agua, es el principal componente del suero (4,5-4,6%), el segundo grupo de componentes más abundantes son las proteínas de suero (0,6-0,65%) y el tercero el contenido de minerales (0,5-0,7%). Sin embargo, a pesar de que la lactosa es el material más abundante en el suero, son las proteínas los componentes más valiosos del suero. Las

propiedades de las proteínas del suero de leche se revisan en la siguiente sección 1.1.2.

1.1.2. Propiedades de las proteínas del suero de leche

El término “proteínas del suero”, se refiere al contenido de la fracción de proteínas del suero de leche. Esta fracción de proteínas son más solubles comparadas con la caseína, y no es coagulable con ácido ni con cuajo y, por lo tanto, cuando se utilizan los procesos clásicos de elaboración de queso, la proteína del suero pasará al suero de cualquier forma. Sin embargo, estas proteínas tienen poca tolerancia a tratamientos térmicos, y esto compromete en gran medida la calidad en términos de su valor biológico (Mehmood et al., 2019). La siguiente Tabla 2 muestra la composición y características térmicas de la fracción de proteínas del suero.

Tabla 2. Características térmicas de la fracción de proteínas del suero.

Proteína de suero	Contenido aproximado g/L	Fracción proteína de suero (%)	Temperatura °C desnaturalización	Estabilidad térmica
α -Lactoalbúmina	0,6-1,7	20	61	Bastante estable
β -Lactoglobulina	2,0-4,0	55	82	Lábil
BSA	0,2-0,4	5	66	Muy lábil
Inmunoglobulinas	0,5-1,0	8	72	Lábil extremo
Proteasa-peptona	0,2-0,4	12	-	Estable al calor
Otras	0,1	1	-	-

Fuente: Adaptado de Jelen, (1992)

Desde el punto de vista tecnológico, la proteína es la fracción más versátil e importante de los componentes del suero de leche. Esta fracción proteica incluye β -Lactoglobulina (β -LG, 55%), α -Lactoalbúmina (α -LA, 20%), Inmunoglobulinas (IGs, 8%), Albúmina de Suero Bovino (BSA, 5 %), Lactoferrina (Lf, 1%),

Lactoperoxidasa (0,5%), Proteasa-peptona (12%) y el Glicomacropéptido (GMP, 12%, liberado al suero por acción de la renina sobre la k-caseína). El uso de las proteínas del suero de leche incluye diversas aplicaciones en la formulación de alimentos, entre las proteínas del suero de leche con propiedades funcionales más sobresalientes se encuentran β -LG, α -LA y BSA. La β -LG, es una proteína globular mayoritaria en el suero de leche y posee excelentes propiedades emulsificantes y gelificantes, caracterizándose como un ingrediente altamente versátil para la formulación de alimentos. La α -LA, además de presentar alta solubilidad en un amplio rango de pH, presenta excelentes propiedades espumantes y emulsificantes, tiene la capacidad de ligar iones calcio (Ca^{2+}) y compuestos hidrofóbicos, como vitaminas liposolubles (vitamina D3), retinol y ácidos grasos. La BSA contiene propiedades similares a la α -LA, y es comúnmente utilizada como proteína modelo para el estudio de sistemas alimentarios emulsionados y aireados. Además de las propiedades biológicas que las proteínas séricas presentan en su estado nativo, también mediante su hidrólisis por procesos enzimáticos o fermentativos, pueden liberar péptidos (cadena corta de aminoácidos, habitualmente de 2 a 50) bioactivos, con efectos benéficos para la salud. Se han reportado secuencias peptídicas provenientes de la hidrólisis de la β -LG y la α -LA que poseen actividad antihipertensiva, antioxidante, antimicrobiana, antidiabética, hipocolesterolémica, inmunoestimulante y anticancerígena (Mazorra-Manzano & Moreno-Hernández, 2019).

1.1.3. Efecto de los BCAA sobre el músculo esquelético

El suero de leche es conocido como suplemento dietético y es muy usado entre atletas y deportistas aficionados. La razón de su uso es la alta concentración de aminoácidos esenciales en su composición, en especial, alta concentración de aminoácidos esenciales de cadena ramificada (BCAA) que posee. La siguiente Tabla 3 muestra la composición aminoacídica de la proteína de suero de leche.

Tabla 3. Contenido aminoacídico de la proteína de suero de leche.

Aminoácido	Contenido (g/ 100g)	Aminoácido	Contenido (g/ 100g)
*Leucina	11,4	Treonina	6,1
*Isoleucina	5,8	Tirosina	3,5
*Valina	5,4	Prolina	5,2
Metionina	2,1	Alanina	5,2
Cisteína	2,5	Serina	5,0
Fenilalanina	3,6	Glicina	2,1
Triptófano	2,0	Arginina	3,0
Histidina	1,9	Aspartato	11,2
Lisina	9,4	Glutamato	17,2

*BCAA. Fuente: Adaptado de Pichon et al., (2007)

Los BCAA, es decir, la leucina, la isoleucina y la valina, constituyen aproximadamente un tercio (33,33%) de las proteínas del músculo esquelético (SK) en humanos. La ingesta de BCAA aumenta el equilibrio de proteínas en el músculo SK, disminuyendo la tasa de descomposición de proteínas o aumentando la tasa de síntesis de proteínas o una combinación de ambas. Esto se explica debido a que cuando se ingieren estos BCAA se mueven hacia el músculo SK, donde se oxidan principalmente, con el fin de suministrar energía adicional. Como resultado, se reduce la cantidad de glucosa que se descompone en el hígado y se libera a la sangre y, en

consecuencia, disminuye el nivel de glucosa en la sangre. Durante ejercicios de resistencia prolongados, la ingesta de los BCAA ayuda a prevenir el deterioro del rendimiento físico, que generalmente es causado por el agotamiento del glucógeno muscular en las últimas etapas de los ejercicios de resistencia (Kim et al., 2013). Además, durante la práctica de ejercicios de resistencia prolongados, la concentración del triptófano libre aumenta y la absorción de triptófano en el cerebro también lo hace. Cuando esto ocurre, las concentraciones del neurotransmisor 5-hidroxitriptamina (también conocida como serotonina) aumentan, como consecuencia del aumento de su precursor, el triptófano, generando sensaciones subjetivas de fatiga. Los BCAA son transportados al cerebro por el mismo sistema transportador que el triptófano y así "compiten" con el triptófano, desplazando a este último, para ser transportados al cerebro. En concordancia con lo anterior, se cree que cuando ciertos aminoácidos como los BCAA están presentes en el plasma en cantidades suficientes, teóricamente puede disminuir la absorción de triptófano en el cerebro y, en última instancia, disminuir la sensación de fatiga. Por otra parte (*la parte más importante*) la ingesta de los BCAA después de realizar ejercicios de resistencia, cuando se genera un daño muscular temporal inducido por el ejercicio que puede durar varios días después. La ingestión específica de los BCAA después de realizar ejercicios de resistencia estimula una mayor síntesis de proteínas musculares que puede atenuar el daño y/o acelerar la recuperación. Entre los BCAA, la leucina desempeña un papel único en la estimulación de la síntesis de proteínas musculares. Este aminoácido sirve como sustrato para la síntesis de nuevas proteínas musculares y también como señal para iniciar el paso de iniciación de la traducción de síntesis de proteínas musculares que limita la velocidad de la síntesis. Esta estimulación de síntesis de proteínas musculares va acompañada de una mayor activación de proteínas

de señalización intracelular que regulan la actividad traslacional de síntesis de proteínas musculares. Específicamente activación de la señalización objetivo de mamífero del complejo de rapamicina 1 (mTORC1), complejo proteico que funciona como un sensor de nutrientes/energía/redox y controla la síntesis de proteínas, en su estado de fosforilación con la proteína quinasa ribosómica S6 (S6K1), es decir, la vía de señalización mTORC1-S6K1. Esto significa que la ingesta de BCAA (donde la leucina es necesaria para la activación máxima de la señalización de mTORC1) aumenta la actividad de la vía de señalización intracelular de mTORC1 y este aumento de actividad resulta en un aumento de la síntesis de nuevas proteínas musculares, después del entrenamiento con ejercicios de resistencia (Howatson et al., 2012; Jackman et al. 2017; Jäger et al. 2007; Kim et al., 2013; Monirujjaman & Ferdouse, 2014)

1.1.4. Producción mundial y chilena de suero de leche

Tanto la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) como el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) publican estadísticas de producción y comercio de los principales productos lácteos, pero no incluyen en ellas al suero de leche como tal. Respecto al Reglamento Sanitario de los Alimentos (RSA), en su Título VIII, párrafo V De los productos lácteos, define diferentes derivados de la leche, entre otras, leche fluida, leche en polvo, leche condensada, yogur, queso, etc. Sin embargo, dentro de ellos no aparece el suero de leche, pues no se trata de un lácteo terminado, sino que corresponde a un subproducto. Es por ello, que la producción de suero debe ser estimada a partir de la producción de queso. En el año 2020, la producción mundial de queso a partir de leche entera de vaca según la FAO fue de 21,7 millones de toneladas. A partir de la

evolución de la producción de queso de leche entera de vaca en el mundo, puede calcularse una producción mundial de suero de leche en los últimos años, que significa una disponibilidad de alrededor de 152,4 millones de toneladas de suero de leche líquido en el año 2010 y de 195,2 millones de toneladas en el año 2020, llegando a un crecimiento que bordea el 28% entre esos años. La Figura 1 muestra la producción mundial de suero de leche líquido entre el 2010 y el 2020.

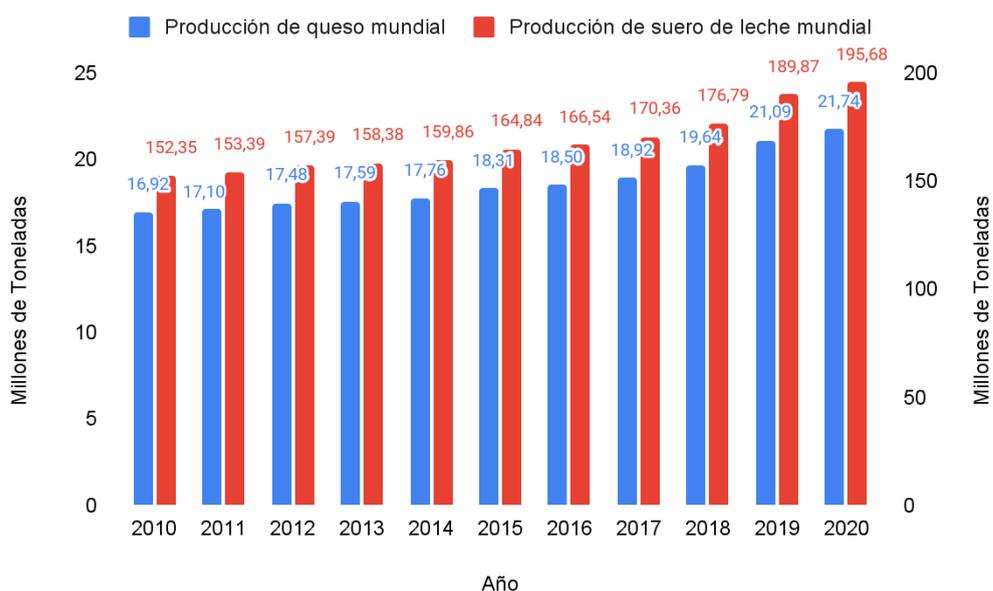


Figura 1. Producción mundial de suero de leche líquido entre 2010 y 2020.
Fuente: Adaptado de FAOSTAT, (2023)

En cuanto al contexto nacional, en Chile la producción total en el año 2021 alcanzó las 122 mil toneladas de queso, un incremento del 3,5% respecto al año anterior, lo que significa una disponibilidad de 1,10 millones y 1,06 millones de toneladas de suero de leche líquido, para el año 2021 y 2020, respectivamente. La Figura 2 muestra la producción chilena de suero de leche líquido entre 2018 y 2021.

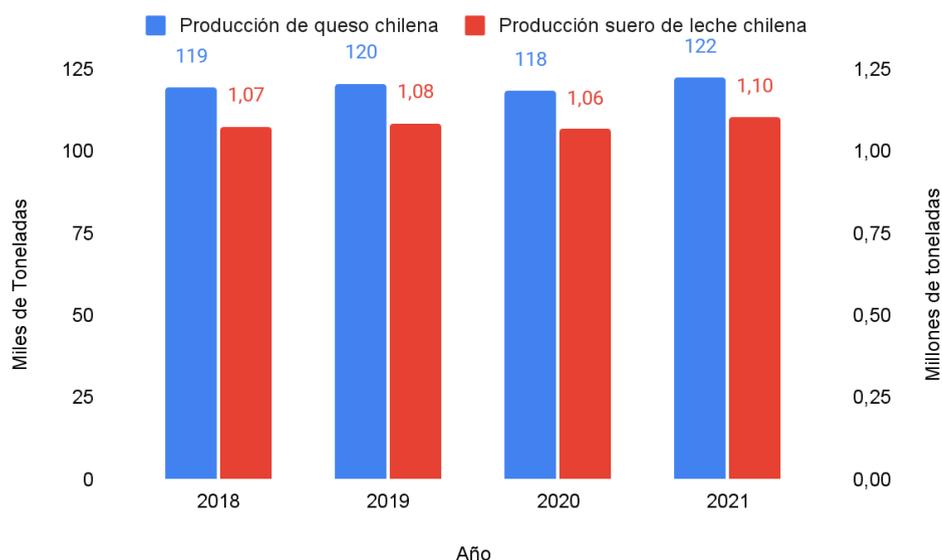


Figura 2. Producción chilena de suero de leche líquido entre 2018 y 2021.
Fuente: Adaptado de ODEPA, (2019) y ODEPA, (2023)

Por otro lado, la producción de quesos, y por tanto la producción de suero de leche líquido, se concentra en las regiones ganaderas del país, específicamente entre la Región de los Ríos (XIV) y la Región de los Lagos (X). La Región de los Ríos (XIV) concentra la mayor producción del país con el 53 % del total (ODEPA, 2023). En todo caso, la producción de quesos y, por tanto, la de suero de leche, ha venido creciendo en el mundo en forma ininterrumpida en los últimos años y es probable que este proceso se mantenga, lo que permitiría pensar en una disponibilidad creciente de suero de leche también en el futuro. En efecto, si se mantiene esta tasa de crecimiento del 28%, observada en la Figura 1, se podría proyectar una disponibilidad de 251 millones de toneladas de suero de leche líquido para el año 2030.

1.2. Manzana (*Malus domestica*)

El árbol de manzana o manzano (*Malus domestica*) fue domesticado en Asia Central, en la región fronteriza entre Kazajistán, Kirguistán y China, aproximadamente en el 6.500 a.C. Con el paso del tiempo, después de siglos de explotación y selección

humana, el cultivo de manzana se convirtió en el principal cultivo frutícola en las zonas templadas. Así la manzana es actualmente la tercera fruta más producida en el mundo (87,2 millones de toneladas/ año), después del plátano (116,8 millones de toneladas/año) y la sandía (100,4 millones de toneladas/año) (De La Peña-Armada & Mateos-Aparicio, 2022; Duan et al., 2017).

Las manzanas contienen varios componentes que han demostrado tener efectos bioactivos, como fitoquímicos, vitamina C y fibra dietética, entre otros. Son ricas en quercetina y pectina, a las cuales se les atribuyen efectos beneficiosos para la salud.

La quercetina pertenece a la familia de los flavonoides. Son compuestos de bajo peso molecular, con una estructura general C6-C3-C6 en la que dos unidades C6 (Anillo A y Anillo B) son de naturaleza fenólica. Los flavonoides son antioxidantes importantes como resultado de su alto potencial redox, lo que les permite actuar como donadores de hidrógeno, agentes reductores y extintores de oxígeno singlete (Bravo, 1998; Tsao, 2010; Tsao et al., 2003).

Respecto a la pectina, esta es un tipo de fibra soluble que puede ayudar a prevenir el estreñimiento y tiene un efecto modesto en la reducción de colesterol LDL. La pectina también es fermentada por bacterias beneficiosas en el colon, lo que produce ácidos grasos de cadena corta que pueden desempeñar un papel en la prevención de enfermedades crónicas, incluidos ciertos tipos de cáncer y trastornos intestinales (Gerhauser, 2008; Koutsos et al., 2015; Vallée et al., 2022; Wojdyło et al., 2008). La Figura 3 muestra los subproductos de la manzana y los compuestos químicos intrínsecos en cada uno de estos subproductos.

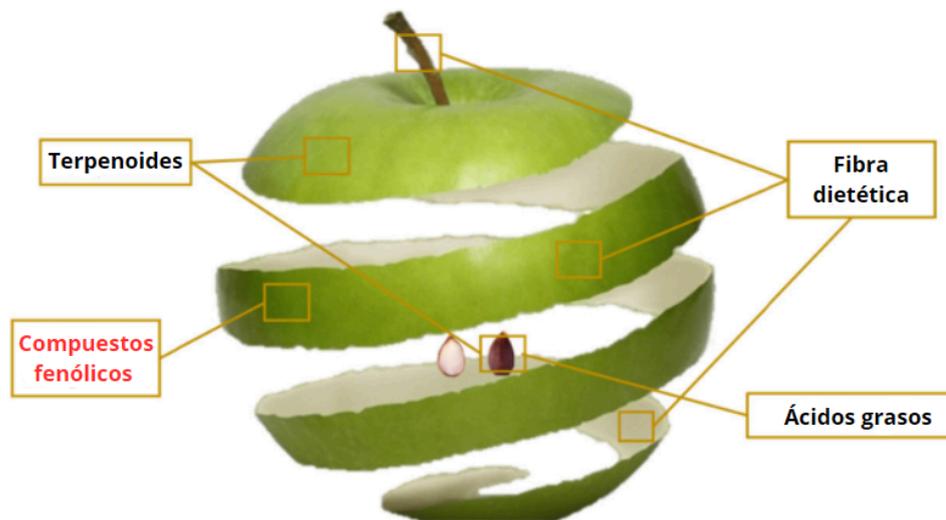


Figura 3. Subproductos químicos de manzana.
 Fuente: Adaptado de De La Peña-Armada & Mateos-Aparicio, (2022)

1.2.1. Compuestos fenólicos en manzanas

Los compuestos polifenólicos de las manzanas se encuentran predominantes en la piel por lo que la mayoría de los polifenoles persisten en la pomasa de manzana. Los compuestos fenólicos de la manzana se concentran principalmente como ácido clorogénico (fenol más importante en la pulpa) y floridzina, forma glucosídica de la fletina (fenol más importante en la piel), como los ácidos cafeico y clorogénico, procianidinas que pertenecen a la familia de los flavonoides, formados a partir de moléculas de catequina y epicatequina, catequinas (isómeros (+)-catequina y (-)-epicatequina) y flavonoles derivados de quercetina.

Los polifenoles están distribuidos por el conjunto del fruto, siendo la corteza, cáscara o piel (epicarpio) donde existe la mayor proporción (aproximadamente el 65% del total), seguido de la pulpa o carne (mesocarpio) donde se concentra el 24% de los polifenoles. La presencia de las diferentes familias de polifenoles a lo largo del fruto no es homogénea. Así, por ejemplo, la concentración de los ácidos hidroxicinámicos disminuye desde el corazón (endocarpio) hasta la epidermis (o epicarpio), al contrario de lo que ocurre con las procianidinas, las catequinas se concentran,

mayoritariamente, en la pulpa y epidermis, los flavonoles y antocianinas se localizan preferentemente en la epidermis y las dihidrochalconas en las semillas (Cervantes-Cardoza et al., 2010; De La Peña-Armada & Mateos-Aparicio, 2022; García & Herrera, 2010; Palomo et al., 2010).

Los compuestos fenólicos que se encuentran en los subproductos de la manzana (Figura 3) incluyen los flavonoides como la clase principal de polifenoles de la manzana, seguidos de los derivados de ácido hidroxicinámico (grupo de compuestos presentes en la pared celular vegetal también conocidos como ácidos fenólicos) cuyos principales compuestos químicos representantes son el ácido cafeico, ácido ferúlico, ácido sinápico y ácido p-cumárico, los flavonoles (o catequinas), un subgrupo de flavonoides, las dihidrochalconas como por ejemplo floretina, un compuesto químico que se puede encontrar en las hojas del árbol de manzana, y también las antocianinas, otro subgrupo de la familia de los flavonoides, además de las catequinas.

1.2.2. Pomasa de manzana

La pomasa de manzana es un producto de desecho obtenido del prensado de manzana, que se produce principalmente en la industria de fabricación de jugo de manzana natural. Los polifenoles se transfieren parcialmente a los jugos correspondientes, pero su ubicación predominante es en la cáscara. Por lo tanto, la mayoría de los polifenoles se encuentran en la pomasa. La concentración de polifenoles de manzana en la pomasa de manzana está influenciada por el método de producción del jugo. La recuperación total de polifenoles es mayor en la pomasa de manzana de la producción de jugo turbio en vez de la de jugo clarificado, ya que acumula una mayor masa de pomasa (Kolodziejczyk et al., 2010; Krawitzky et al.,

2014; Padayachee et al., 2012). La Figura 4 muestra los subproductos obtenidos del procesamiento de manzana (Rabetafika et al., 2014)

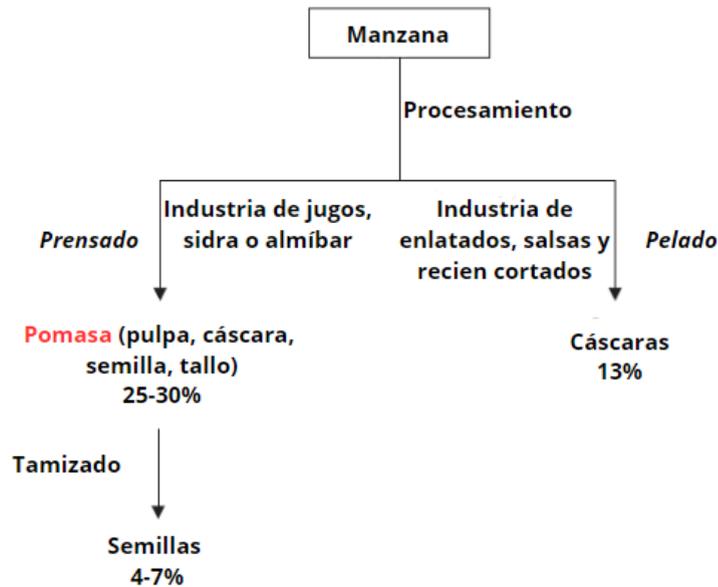


Figura 4. Subproductos a partir del procesamiento de manzana.
Fuente: Adaptado de Rabetafika et al., (2014)

La Figura 4 muestra que los residuos sólidos que constituyen la pomasa proveniente del prensado, representan entre el 20-30% del peso fresco de la manzana. Esta pomasa de manzana es una masa heterogénea que consiste principalmente en cáscara y pulpa de manzana (95%) núcleo con semillas (2-4%) y tallos. La pomasa de manzana representa una fuente de compuestos bioactivos de bajo costo, principalmente: compuestos fenólicos (262–999 mg/100 g d.s.) y fibra dietética (26,8–82 g/100 g d.s.), los cuales pueden utilizarse ampliamente en la industria alimentaria debido a sus efectos beneficiosos para la salud. La Tabla 4 muestra los compuestos fenólicos en la pomasa de manzana.

Tabla 4. Compuestos fenólicos en la pomasa de manzana.

Nombre	Subgrupo o familia	Contenido mg/100 g
quercetina-O-rutinósido (rutina)	Flavonoles	4,21
quercetina-3-O-galactósido	Flavonoles	32,63
quercetina-3-O-glucósido	Flavonoles	8,40
quercetina-3-O-arabinósido	Flavonoles	11,55
quercetin-3-O-xilósido	Flavonoles	19,60
quercetina-3-O-ramnósido	Flavonoles	26,80
isorhamnetina-3-O-galactósido	Flavonoles	1,30
isorhamnetina-3-O-glucósido	Flavonoles	0,90
ácido 5-cafeoilquínico (Ácido clorogénico)	Ácidos fenólicos	22,70
ácido criptoclorogénico	Ácidos fenólicos	1,20
ácido p-cumaroilquínico	Ácidos fenólicos	1,83
(+) catequina	Flavan-3-oles	1,67
procianidina B2	Flavan-3-oles	3,79
(-) epicatequina	Flavan-3-oles	1,35
floretin-2-O-xilosilglucósido	Dihidrochalconas	1,90
floretina 2-O-glucósido (floridzina)	Dihidrochalconas	21,30

Fuente: Adaptado de Kruczek et al., (2023)

La Tabla 4 muestra que los compuestos polifenólicos de la pomasa de manzana son principalmente derivados de quercetina. Entre estos, los predominantes son los quercetin-3-O-galactósido, seguido de quercetina-3-O-ramnósido y quercetina-3-O-xilósido. Entre los ácidos fenólicos (derivados del ácido hidroxicinámico), el ácido clorogénico es el más abundante en la pomasa de manzana siendo aprox. 20 y 13 veces mayor que el ácido criptoclorogénico y ácido p-cumaroquínico, respectivamente. Entre los flavan-3-oles se observa que están presentes en la pomasa contenidos de (+)-catequina, las procianidinas B2 y la (-)-epicatequina. Mientras que del subgrupo de las dihidrochalconas la floridzina es el

más abundante. Respecto a la pomasa de manzana deshidratada, el patrón polifenólico se asemeja al de las manzanas frescas, mostrando altos contenidos de ácido clorogénico, ácido cafeico, (+)-catequina, (-)-epicatequina, rutina y glucósidos de quercetina. La floridzina es el polifenol más prominente en la pomasa de manzana después del secado (Ćetković, et al., 2008; Kammerer et al., 2014).

Además, la composición de la pomasa de manzana varía según la variedad de la manzana y el tipo de proceso utilizado para la extracción del jugo, principalmente de cuántas veces se prensa la fruta, cuyo contenido de humedad (después del prensado) es de aproximadamente 70–85% (Cetkovic et al., 2008; Kruczek et al., 2023; Rabetafika et al., 2014; Waldbauer et al., 2017). En relación a lo anterior, las manzanas deshidratadas de sabor amargo (sabor característico en manzanas inmaduras) tienen un contenido fenólico total más alto en comparación a las manzanas maduras para consumo fresco. Esto se debe a que los compuestos fenólicos en las manzanas actúan como pesticidas naturales proporcionando cierto grado de protección contra la depredación, parásitos y resistencia a patógenos, cuando estas aún son pequeñas e inmaduras y/o se encuentran en crecimiento (Drewnowski & Gómez-Carneros, 2000; Sanoner et al., 1999; Vrhovsek et al., 2004).

1.2.3. Actividad prebiótica

De acuerdo con la definición de Gibson et al. (2010), un prebiótico dietético es “un ingrediente fermentado selectivamente que produce cambios específicos en la composición y/o actividad de la microbiota intestinal, confiriendo beneficios a la salud del huésped”. En relación con la definición anterior, los compuestos fenólicos, específicamente los no extraíbles que están unidos a la matriz alimenticia mediante enlaces covalentes (por ejemplo: proantocianidinas con enlace covalente con la fibra

dietética), pueden resistir la digestión gastrointestinal ya que la unión de procianidinas con la pared celular de la manzana aumenta el grado de polimerización e inhibe la degradación enzimática de las paredes celulares, permitiendo que puedan llegar al colon para ser metabolizados mediante fermentación bacteriana. Esta interacción con la microbiota intestinal es recíproca, ya que las bacterias comensales transforman los polifenoles en metabolitos secundarios, aromáticos simples, que pueden tener efectos intestinales locales, y efectos sistémicos después de la absorción; mientras que los polifenoles tienen la capacidad de modular la composición de la microbiota intestinal, inhibiendo algunas poblaciones bacterianas y estimulando otras, en beneficio de la salud gastrointestinal. Análogamente, las fibras dietéticas provenientes de la manzana, por ejemplo la pectina, la principal fibra soluble que contiene homogalacturonanos (que consta de largas cadenas de ácidos galacturónicos unidos α -(1-4)) y ramnogalacturonanos (con fuerte acción bacteriostática sobre *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus faecalis*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*) no se absorben en el intestino delgado y evade la digestión mediante enzimas intestinales pasando directamente al colon, donde es metabolizada (fermentada) por bacterias de la microbiota intestinal que utilizan la pectina, como las bifidobacterias fecales y lactobacilos. Estas bacterias beneficiosas probióticas, que viven juntas en relaciones simbióticas o antagónicas con otras poblaciones bacterianas, producen ácidos grasos de cadena corta (SCFA) como resultado de la fermentación de la pectina. El aumento SCFA intestinal provocado por el aumento del número de bifidobacterias y lactobacilos, está relacionado con la inhibición del crecimiento de bacteroides. Los SCFA, en particular el ácido butírico, junto con los compuestos fenólicos son beneficiosos para las células del colon porque estos nutrientes ayudan a aumentar la integridad de la barrera del colon y protegen

contra los patógenos y la presencia de endotoxinas en la sangre. Un resultado llamativo sobre la composición de las poblaciones relativas de la microbiota de ratones, reportado por Condezo-Hoyos et al., (2014), mostró que las heces cultivadas con compuestos no digeribles de manzana Granny Smith cambiaron el perfil bacteriano del material fecal obeso hacia el perfil de las heces de ratones delgados. En efecto, el consumo regular de manzana, mejora el ambiente intestinal y tiene efectos beneficiosos (Condezo-Hoyos et al., 2014; Koutsos et al., 2015; Shinohara et al., 2010).

1.2.4. Producción mundial y chilena de manzana

Para el año 2022 la producción mundial de manzana fue de 82,73 millones de toneladas, siendo los máximos productores China (52,28%) y la Unión Europea (16,29%). Otros productores importantes son Turquía (6,08%), Estados Unidos (5,48%), India (3,00%), Irán (2,81%), Rusia (1,96%), Sudáfrica (1,47%), Ucrania (1,42%) y Chile (1,29%). La producción a nivel mundial ha ido creciendo paulatinamente en los últimos años llegando a un crecimiento que bordea el 14% entre los años 2019 y 2022 (USDA, 2023). La Figura 5 muestra la producción mundial de manzanas entre 2019 y 2023.



Figura 5. Producción mundial de manzanas entre 2019 y 2023*.

Fuente: Adaptado de USDA, (2023)

*estimado

En cuanto al contexto nacional, Chile ocupa el décimo lugar, entre los mayores productores a nivel mundial, alcanzando el año 2022 una producción cercana a los 1,04 millones de toneladas. Se prevé que la producción de Chile para 2023 se contraiga ligeramente a 1,01 millones de toneladas debido a que las continuas disminuciones en la superficie cultivada se compensan en gran medida con un mayor rendimiento debido a las buenas condiciones de crecimiento. Chile exporta la gran mayoría de su producción de manzanas teniendo como destinos principales Estados Unidos, Europa, Latinoamérica y medio oriente. Para el año 2022 Chile exportó a estos destinos 603 mil toneladas y se prevé, para este año 2023, que los menores volúmenes reducirán las exportaciones a 585 mil toneladas (USDA, 2023). La evolución de la producción y exportaciones chilenas se presentan en la Figura 6.

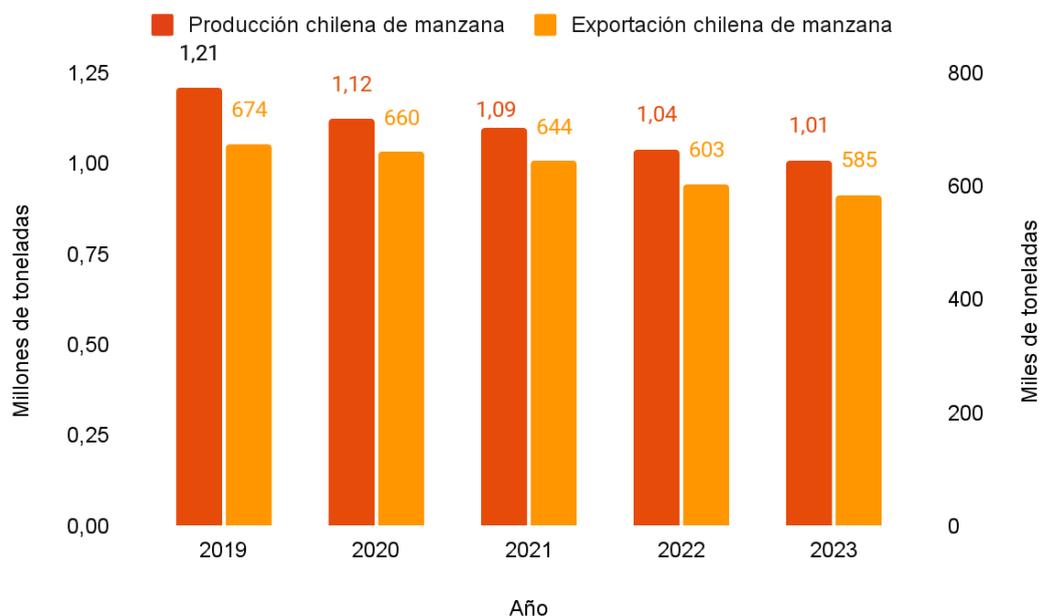


Figura 6. Producción y exportación chilena de manzanas entre 2019 y 2023.
Fuente: Adaptado de USDA, (2023)

Por otra parte, el jugo de manzana es el principal jugo de fruta que se elabora a nivel país, y abarca un 76% junto con el jugo de uva. La materia prima utilizada corresponde a descartes de frutas de exportación. Las variedades más utilizadas son Granny Smith, Royal Gala, Fuji, Pink Lady, Red Delicious y Braeburn (Zagal, 2013).

1.3. Antimicrobianos naturales

Los antimicrobianos actúan contra los microorganismos, ya sea erradicándolos (microbicidas) o retardando el crecimiento de los microorganismos (microbiostáticos). Esto lo hacen dirigiéndose al ADN y sus procesos asociados, atacando los procesos metabólicos, incluida la síntesis de proteínas, o interfiriendo con la síntesis y función de la pared celular. Estos compuestos químicos naturales pueden ser metabolitos primarios o secundarios. Los metabolitos primarios son los productos químicos que tienen una función esencial en el organismo, mientras que los metabolitos secundarios no tienen una función esencial en el organismo. Sin

embargo, estos últimos han demostrado poseer actividad antimicrobiana, por ejemplo, metabolitos secundarios provenientes de las plantas denominándolos antimicrobianos naturales. Las plantas pueden contener sustancias químicas con estructuras complejas que sintéticamente serían difíciles de obtener y con diferentes mecanismos de acción, en comparación con los agentes antibacterianos tradicionales.

Los antimicrobianos naturales tienen propiedades antimicrobianas y antioxidantes al mismo tiempo, por lo que se consideran una mejor opción en comparación con los conservantes sintéticos. Entre estas opciones naturales los aceites esenciales son fuentes potenciales de principios activos antimicrobianos, por ejemplo: el aceite de corteza de canela que se obtiene del canelo (*Cinnamomum zeylanicum*) miembro de la familia de *Angiospermas Lauraceae* (Asif, 2017; Arshad & Batool, 2017; Thirapanmethee et al., 2021).

1.3.1. Canela (*Cinnamomum spp.*)

La canela se obtiene de la corteza interna de varios árboles del género *Cinnamomum spp.* Las especies más comunes son *Cinnamomum cassia* (canela china, comúnmente conocida como *Cassia*) y *Cinnamomum verum* (también llamada *Cinnamomum zeylanicum*, comúnmente conocida como canela verdadera). Estas dos especies contienen un porcentaje variable de cinamaldehído, con hasta un 85,3% y un 90,5%, respectivamente. Este último compuesto, específicamente el isómero trans-cinamaldehído, ha sido identificado como el responsable de muchas de las propiedades antimicrobianas de la canela, inhibiendo eficazmente el crecimiento de una variedad de microorganismos, tales como bacterias, mohos y levaduras, además de inhibir la producción de toxinas producidas por estos microorganismos. En particular, el cinamaldehído muestra un amplio espectro de actividad antimicrobiana

al inhibir patógenos transmitidos por los alimentos y microorganismos contaminantes. El cinamaldehído tiene un efecto antibacteriano contra bacterias grampositivas (*Bacillus sp.*, *B. cereus*, *E. faecalis*, *Leuconostoc sp.*, *M. luteus*, *S. aureus*, *Streptococcus sp.*, *L. monocytogenes*, *L. grayi*) y bacterias gramnegativas (*E. coli*, *P. aeruginosa*, *P. fluorescens*, *S. dysenteriae*, *S. Typhimurium*). La canela o sus componentes, específicamente el cinamaldehído, causa los siguientes efectos sobre las bacterias: alteraciones en la membrana celular y su perfil lipídico; inhibición de la ATPasa, división celular, porinas de membrana, motilidad y formación de biopelículas; y efecto de anti-*quórum sensing*.

Por otro lado, la acción beneficiosa del cinamaldehído sobre la salud se debe a que es capaz de disminuir la presión arterial mediante su interacción con los canales de calcio celulares, así como de reducir los niveles de glucosa en sangre gracias a un incremento de la sensibilidad a la insulina. No obstante, lo más sorprendente es su papel en el Alzheimer y en la pérdida de viabilidad de células cancerosas. Eventualmente, la canela (*Cinnamomum spp.*) es una de las especias más antiguas conocidas por la humanidad y se utiliza en prácticas culinarias y de medicina tradicional (Doyle & Stephens, 2019; Lucas-González et al., 2023; Modi et al., 2019; Pereira et al., 2021).

1.4. Secado

El secado es uno de los métodos de conservación de alimentos más antiguos conocidos por la humanidad. El secado o deshidratación es, por definición (exceptuando deshidratación osmótica), la eliminación del agua por evaporación, de un alimento sólido o líquido, con el fin de obtener un producto sólido suficientemente bajo en contenido de agua (Berk, 2018). Este proceso involucra la remoción de agua

desde una fuente de alimento húmeda, a través de la inducción de cambios de fase del agua, del líquido al vapor, mediante la aplicación de calor. Esta aplicación de calor en los procesos de secado consume grandes cantidades de energía, por lo que el mayor reto es remover al agua en un modo que sea lo más eficiente y limpio posible, con un mejor control de la calidad, mínimo impacto ambiental, menor capital y costos de operación (Ízli et al., 2014; Muñoz-López et al., 2018; Sabarez, 2015).

Los beneficios de secar alimentos son varios, entre ellos, se encuentran la conservación del alimento, como resultado de la disminución de la actividad del agua, reducción de peso y volumen, transformando un alimento en una forma más cómoda de almacenar, envasar, transportar y utilizar. Por ejemplo, transformación de líquidos como leche, huevos, jugos de frutas y verduras o extractos de café, en un polvo seco que se puede reconstituir a su forma original (productos instantáneos); dar a un producto alimenticio una característica particular deseable, como un sabor diferente, un carácter crujiente, masticable, etc. Es decir, crear un alimento nuevo, por ejemplo: transformación de uvas en pasas (Berk, 2018; Moses et al., 2014).

1.4.1. Secado de Ventana de Refractancia (RW)

El secado de ventana de refractancia es una nueva tecnología para evaporar el agua de alimentos líquidos o semilíquidos. Es una técnica de contacto de calor indirecta, en la que se transmite calor al alimento desde agua caliente en circulación, generalmente entre 95-97°C y a presión atmosférica, utilizando como medio de transporte un film de 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, tiene una transmitancia total mínima entre las longitudes de ondas del rango de 6,5 y 14,5 μm . El porcentaje de transmitancia de calor por radiación es mayor a menor espesor

de film y cuando la fuente de calor, agua en el caso de RW, tiene una mayor temperatura. Esta propiedad óptica es la que llevó a Richard Magoon a utilizar este film (Mylar®) para inventar y patentar el proceso de Ventana de Refractancia™ (Nindo & Tang, 2007; Pavan et al., 2012; Phillip, 2004; Shende & Datta, 2019). Durante el secado RW, los tres modos de transferencia de calor, a saber, conducción (q_{cond}), convección (q_{conv}), y radiación (q_{rad}), están activos. La siguiente Figura 7 muestra la transferencia de energía térmica en el sistema de secado RW.

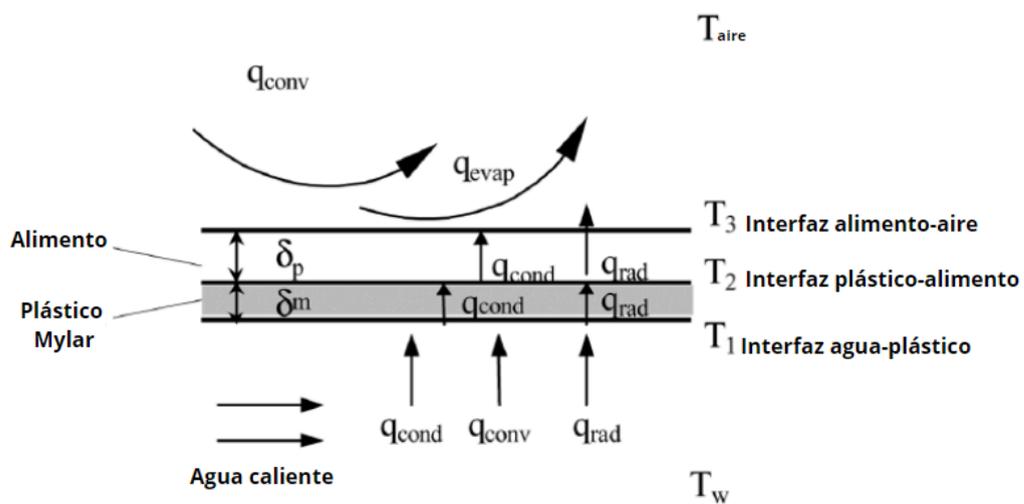


Figura 7. Transferencia de energía térmica en el sistema de secado RW.
Fuente: Adaptado de Nindo & Tang, (2007)

El uso de agua de proceso a temperaturas justo por debajo de la de ebullición y un transportador de plástico delgado con transmisión de infrarrojos en el rango de longitud de onda, que coincide con el espectro de absorción del agua, trabajan juntos para facilitar el secado rápido. La transmisión de infrarrojos es más fuerte cuando la interfaz plástica está en contacto íntimo con agua en un lado y un material cargado de humedad en el otro lado. Cuando un producto alimenticio con alto contenido de humedad se esparce sobre el transportador de plástico delgado (en vez de un escenario donde solo hay aire o un alimento muy seco sobre el transportador), se minimiza la refracción en la interfaz plástico-alimento, lo que hace que la energía térmica radiante pase a través del plástico hacia el producto. Esto último se conoce en

la literatura como “ventana de refracción”. La siguiente Figura 8 muestra dos casos, baja transmisión y alta transmisión, en el sistema de transferencia térmica por RW

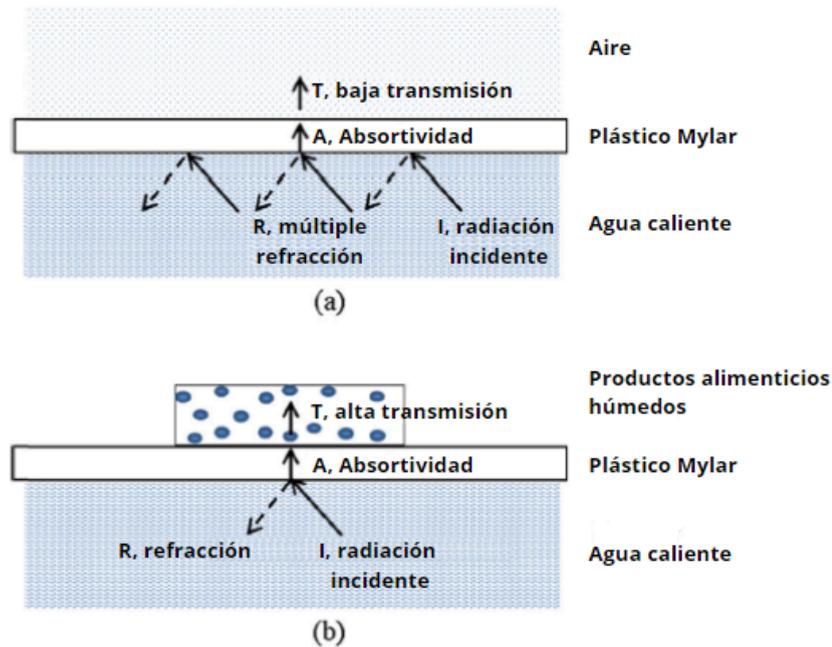


Figura 8. Sistema de alta y baja transferencia térmica por RW.
Fuente: Adaptado de Ortiz-Jerez et al., (2015)

La absorptividad del producto alimenticio está influenciada por su espesor y el contenido de humedad. La transferencia de energía térmica del alimento al aire (ambiente) se realiza principalmente por convección y enfriamiento por evaporación del material alimenticio. Esta evaporación es muy intensa y constituye una parte importante del consumo energético en el secado RW. En la última etapa del secado RW, cuando el producto está casi seco, la transferencia de calor por conducción se vuelve predominante y la velocidad de transferencia de calor al producto se ralentiza a medida que el producto se seca más (Nindo & Tang, 2007; Ortiz-Jerez et al., 2015). El secado por ventana de refractancia tiene inmensas ventajas en términos de calidad del producto final (atributos de color, textura, retención de nutrientes, vitaminas y antioxidantes), consumo energético, y tiempos de deshidratación, en comparación a otros métodos de secado convencional como el secado natural o el secado por aire caliente. Es un método sencillo y relativamente económico, en términos de calidad

del producto final es comparable a la liofilización, sin embargo, a diferencia de la liofilización el secado por ventana de refractancia cuenta con la ventaja de que suele necesitar un equipamiento menos costoso (Nindo & Tang, 2007; Kumar et al., 2022)

1.4.2. Curvas de secado

Las curvas de secado expresadas como el contenido de humedad (θ) versus tiempo (t) o expresadas como la razón de humedad (MR) versus tiempo (t), obtenidas por la pérdida de peso y el tiempo durante el secado son útiles para describir la cinética ocurrida durante un proceso de secado. En procesos de secado se puede medir el peso de las muestras en función del tiempo, con estos datos y la humedad inicial (θ_i), se puede calcular el contenido de humedad de las muestras y construir un gráfico del contenido o la razón de humedad versus tiempo (Bennamoun & Li, 2018; Kerr, 2019). Las curvas de secado son modeladas, es decir, son simulados por un modelo matemático que es una analogía matemática de la realidad física, y que describe las propiedades y características de un sistema real en términos de variables matemáticas y operaciones, de modo que se pueden distinguir tres regiones o fases típicas:

- 1) La fase de calentamiento o inducción: En esta fase el producto absorbe la energía del medio de calentamiento y su temperatura aumenta. 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. Es importante observar que esta fase no necesariamente se presenta en todos los casos de secado.
- 2) La 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 (temperatura, aire y humedad) del proceso permanecen constante y se mantiene mientras la superficie del producto permanece saturada con agua, que se evapora desde la superficie y se transporta desde el interior hasta la superficie por difusión para reemplazar la pérdida, es la evaporación de agua desde la superficie el mecanismo que controla esta fase. A medida que las muestras se secan su contenido de humedad disminuye y se acerca al contenido de humedad crítico (θ_k), una vez alcanzado este punto la velocidad de secado empieza a disminuir.

- 3) La fase de velocidad decreciente: Se produce por debajo del contenido de humedad crítico (θ_k), a medida que el contenido de humedad disminuye esta se acerca al contenido de humedad de equilibrio (θ_0), 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 debido a que la resistencia del agua a moverse aumenta (a menor contenido de humedad mayor es la resistencia del agua), el movimiento de agua como líquido o gas en el interior del producto se realiza por capilares, espacio intracelulares o espacios vacíos en el interior, es por lo cual, el transporte de agua interno el mecanismo limitante de la velocidad. En el producto su superficie ya no se encuentra saturada de agua por lo que aumenta la temperatura interna del producto (Berk, 2018; Breslin, 2020; Kerr, 2019). La curva típica de secado en alimentos se muestra en la siguiente Figura 9.

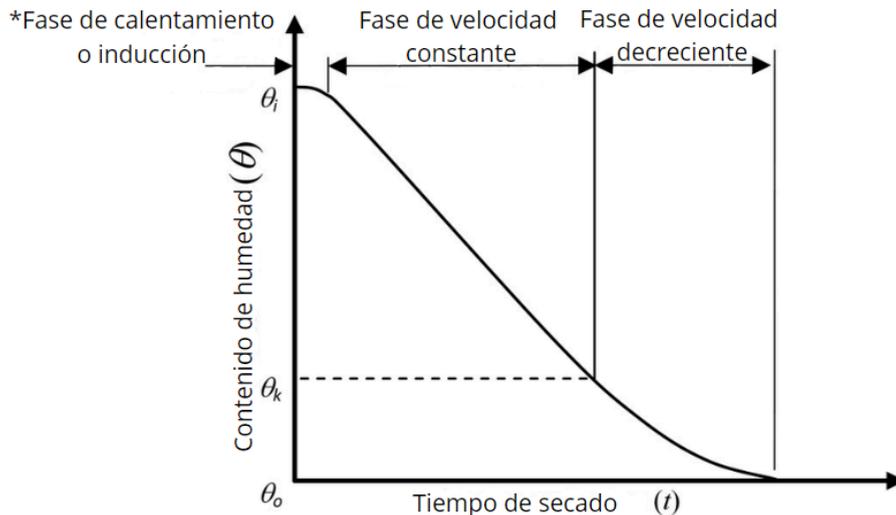


Figura 9. Curva típica de secado en alimentos.

*La fase de calentamiento no necesariamente se presenta en todos los casos.

Fuente: Adaptado de Ip & Wan, (2011)

El conocimiento de las cinéticas de secado de alimentos a escala de laboratorio es esencial para diseñar, simular, optimizar y gestionar el proceso de secado a escala industrial. La creciente demanda de productos secos de alta calidad también requiere una investigación de las características de secado, ya que las investigaciones acerca de las características de secado nos permiten tener un mayor control sobre la conservación de los atributos de calidad en los productos secos, los cuales se ven influenciados por el manejo de las condiciones del secado (Torrez & Giner, 2014)

1.4.3. Modelamiento matemático del proceso de secado

Los modelos matemáticos permiten explicar de manera clara y precisa las relaciones entre diferentes variables y cómo interactúan entre sí. En muchos casos, los modelos matemáticos se utilizan para optimizar condiciones o parámetros. Por ejemplo, en ingeniería, se pueden utilizar para optimizar el diseño de un sistema o proceso, maximizando ciertos resultados o minimizando costos. También son útiles para diseñar experimentos de manera eficiente, ayudando a identificar qué variables son más relevantes para obtener información valiosa. Además, permiten respaldar la toma

de decisiones informadas, ayudando a prever consecuencias en diferentes escenarios de riesgo (Coradi et al., 2014).

En la literatura se mencionan varios modelos para analizar los procesos de secado de productos higroscópicos (que absorben humedad). Estos modelos se dividen en tres categorías, modelos teóricos, semi teóricos y empíricos, pero las categorías de modelos más aplicadas son los modelos semi teóricos y empíricos (Inyang et al., 2018). El método empírico es un método basado en datos experimentales y análisis adimensional. Los modelos empíricos de secado muestran una relación directa entre el contenido de humedad promedio y el tiempo de secado. Se ha dado mucho énfasis al desarrollo de modelos semi teóricos para lograr la armonía entre teoría y facilidad de uso. Estos modelos semi teóricos generalmente se basan en la ley de enfriamiento de Newton aplicada a la transferencia de masa. Al aplicar esta ley se supone que las condiciones son isotérmicas y que la resistencia a la transferencia de humedad se limita únicamente a la superficie del producto. Entre los modelos semi-teóricos, se encuentran el modelo de Henderson y Pabis, Newton/ Lewis, Page y Page Modificado y entre los modelos empíricos, se ha utilizado el modelo probabilístico de Weibull para describir el comportamiento de la cinética de rehidratación (Corzo et al., 2008; Coradi et al., 2014; Inyang et al., 2018). La siguiente Tabla 5, muestra una visión general rápida de los modelos matemáticos de secado disponibles.

Tabla 5. Modelos matemáticos aplicados en secados de capa fina (Inyang et al., 2018)

Modelos matemáticos de secado de alimentos	
<u>Newton/Lewis</u> $MR = -e^{-kt}$	<u>Page</u> $MR = e^{-kt^n}$
<u>Page Modificado</u> $MR = e^{-(kt)^n}$	<u>Page Modificado II</u> $MR = e^{[-k(\frac{t}{L})^n]}$
<u>Page Modificado III</u> $MR = e^{[-(\frac{t}{a})^n]}$	<u>Henderson y Pabis</u> $MR = ae^{-kt}$
<u>Logarítmica</u> $MR = ae^{-kt} + c$	<u>Dos Términos</u> $MR = ae^{-k_0 t} + be^{-k_1 t}$
<u>Dos Términos exponencial</u> $MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$	<u>Wang y Singh</u> $MR = M_0 + at + bt^2$
<u>Singh et al.</u> $MR = e^{-kt} - akt$	<u>Enfoque de Difusión</u> $MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$
<u>Verma et al.</u> $MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-gbt}$	<u>Henderson y Pabis modificado</u> $MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
<u>Modelo Aghabashlo</u> $MR = e^{-\frac{-kt}{1+k_0 t}}$	<u>Ademiluyi Modificado</u> $MR = ae^{-(kt)^n}$
<u>Weibull</u> $MR = e^{[-(\frac{t}{\beta})^\alpha]}$	<u>Midilli et al.</u> $MR = ae^{-kt^n} + bt$
<u>Modelo Peleg</u> $M - M_0 = -\frac{1}{k_1 + tk_2} \frac{dm}{dt}$	<u>Silva et al.</u> $MR = e^{-at - bt^{\frac{1}{2}}}$
<u>Thompson .</u> $MR = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$	<u>Geométrica</u> $MR = at^{-n}$
<u>Combinación de Dos Términos y Page</u> $MR = ae^{-kt^n} + be^{-ht^n}$	<u>Balbain y Sain</u> $MR = (1 - a)e^{-kt^n} + b$
<u>Hasibuan y Daud</u> $MR = 1 - at^n e^{-kt}$	<u>Vega- Lemus</u> $MR = (a + kt)^2$
<u>Difusión de Fick simplificada</u> $MR = ae^{-kt} + c$	<u>Hii et al.</u> $MR = ae^{-k_1 t^n} + be^{-k_2 t^n}$

1.4.4. Análisis estadístico de los modelos matemáticos de secado

El ajuste de los modelos de secado en capa fina se evalúa a través de diferentes medidas estadísticas, tales como, coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación (R^2), Chi cuadrado reducido (χ^2), error de sesgo medio (MBE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), error cuadrático de suma (SSE), error cuadrático medio relativo (RRMS), eficiencia de modelado (EF), error porcentual medio (MPE) y error cuadrático medio (MSE). Entre los mencionados anteriormente, los valores del coeficiente de determinación R^2 se pueden utilizar para probar la relación lineal entre los valores calculados (experimentales) y del modelo (predichos), y es uno de los principales criterios para abordar la selección del mejor modelo. En este sentido se dice que se ha producido bondad de ajuste en un modelo si el valor de R^2 es alto y los otros criterios como los valores de χ^2 , RMSE, MBE, MPE, SSE, RRMS, EF, MSE son bajos (Inyang et al., 2018; Zhang et al., 2016).

2. HIPÓTESIS

La utilización de residuos agroindustriales con elevado valor nutricional, como el suero de leche y la pomasa de manzana deshidratada permitirá formular un prototipo de bebida saludable conservada con un antimicrobiano natural emulsionado, optimizando las variables de respuesta y alcanzando una alta deseabilidad global.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Estudiar la formulación de un prototipo de bebida proteica saludable alta en antioxidantes utilizando subproductos agroindustriales como el suero de leche y la pomasa de manzana deshidratada por secado de ventana de refractancia, saborizada con jugo de manzana natural y conservada con una emulsión de cinamaldehído.

3.2. Objetivos específicos

- 1- Estudiar el efecto de las temperaturas de secado en capa fina por ventana de refractancia (70°C, 80°C y 90°C) sobre los parámetros cinéticos, color y el contenido de polifenoles de la pomasa de manzana para seleccionar el mejor tratamiento de secado.
- 2- Caracterizar diferentes formulaciones de bebidas proteicas saludables para cuantificar las variables de respuesta (pH, sólidos solubles, contenido de polifenoles, capacidad antioxidante, contenido proteico).
- 3- Optimizar las variables de respuestas de las formulaciones mediante metodología de superficie de respuesta para seleccionar la mejor combinación de los factores experimentales mezcla de bebida y pomasa de manzana.

4. METODOLOGÍA

A continuación, la siguiente Figura 10 muestra las etapas del proceso de estudio de formulación de la bebida proteica saludable

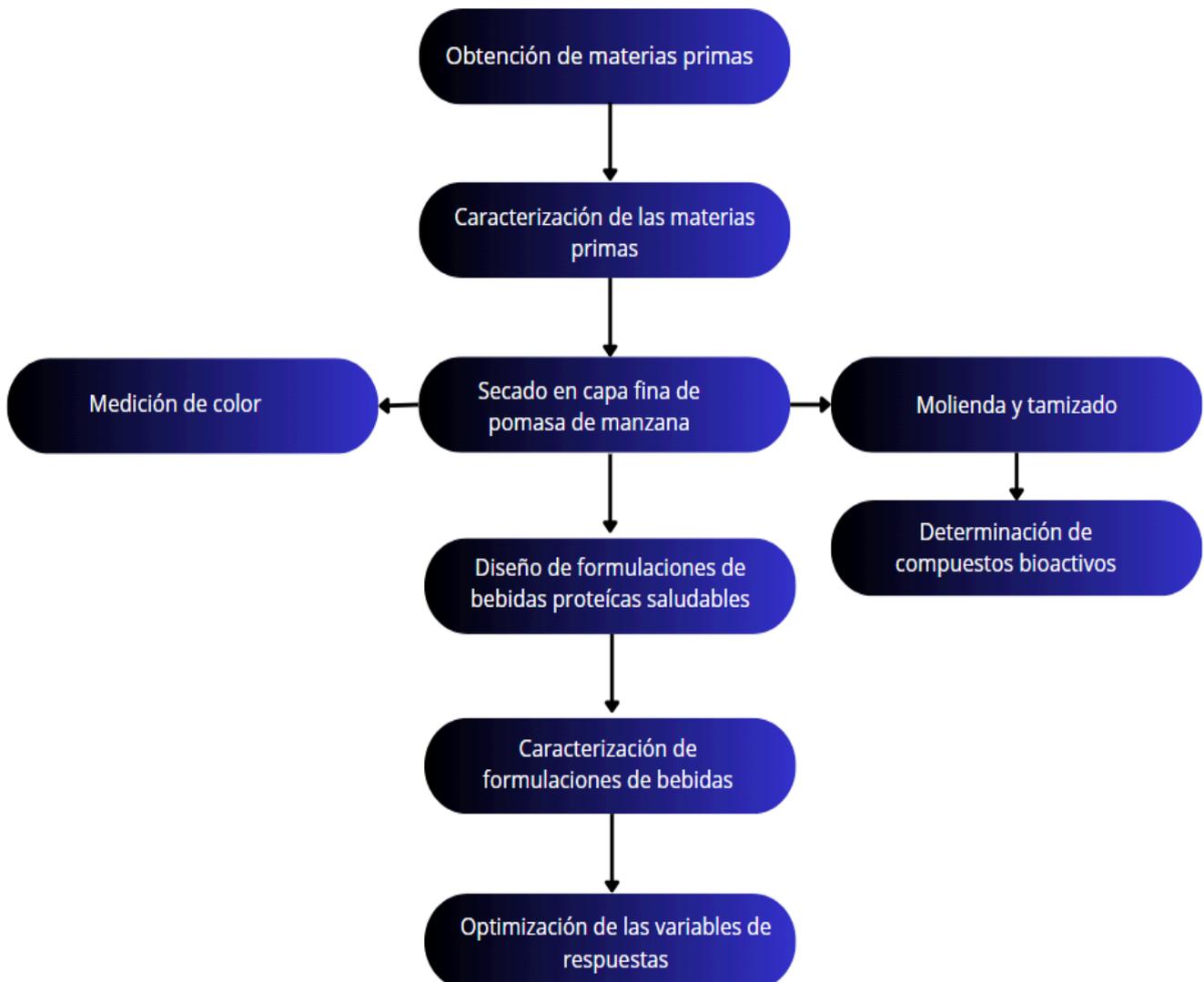


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de estudio de formulación

DESCRIPCIÓN DE ETAPAS

4.1. Obtención de materias primas

4.1.1. Suero de leche

Se elaboró queso fresco a partir de leche semidescremada comercial UHT (Soprole, Santiago, Chile) con contenido de grasa total 1,5 % a la cual se le añadió 1 g de cuajo (enzima) más 2 g de $CaCl_2$ por cada litro de leche. Para favorecer la coagulación, se sostuvo la temperatura a 37°C durante 45 min y se incorporó agitación a 400 rpm, utilizando un agitador magnético con placa calefactora. De esta forma, se produjo la precipitación de la caseína, obteniéndose como producto queso fresco que se removió por filtración por gravedad mediante el uso de una tela esterilizada, y se separó el suero de leche dulce. Posteriormente, con el fin de estabilizar microbiológicamente el suero e inactivar las enzimas, se realizó una pasteurización (Alfa Laval, Suecia) a 72°C por 15 s, seguida de un enfriamiento rápido hasta llegar a 15°C. Una vez estabilizado, el suero se fraccionó en botellas de 500 mL y se almacenó a -20°C en el congelador, hasta el momento de su uso. El rendimiento de la separación se obtuvo según la siguiente Ecuación 1, donde el denominador 80% es el porcentaje estimado de volumen de suero obtenido a partir del volumen de leche utilizado.

$$\% R_{\text{separación}} = \frac{\% \text{ suero de leche} \times 100\%}{80\%} \text{ (Ec. 1)}$$

4.1.2. Extracción de subproductos de manzana (jugo, pomasa, descartes)

Se realizó una extracción del jugo de manzana, variedad 'Royal Gala', calibre 80/85, categoría primaria con país de origen Chile, mediante el método de prensado en frío (exprimido espiral o tornillo sin fin) utilizando un extractor de jugo (Slow Juicer Pro

EasyWays, USA), con el fin de obtener jugo y pomasa de manzana. Previamente, las manzanas fueron lavadas utilizando un litro de agua, al cual se le agregó 6 mL de cloro disueltos en 4 L de agua. Los descartes de la manzana (semillas y tallos) fueron pesados y eliminados, mientras que el jugo y la pomasa se almacenaron a -20°C en el congelador. El rendimiento de la extracción se obtuvo según la siguiente Ecuación 2.

$$\% R_{\text{extracción}} = \frac{\text{Volumen real jugo}}{\text{Volumen teórico jugo}} \times 100 \text{ (Ec. 2)}$$

4.1.3. Emulsificación del Cinamaldehído

Para la preparación de la emulsión de cinamaldehído se hidrataron 5 g de concentrado de proteína de suero (WPC, Lactoprin-80, Prinal, Chile), en 90 mL de agua, previamente esterilizada. La proteína se hidrató por agitación a 400 rpm. durante 24 horas a 4 °C. Posteriormente, a la disolución se agregaron 5 g del antimicrobiano natural cinamaldehído y se homogeneizó a velocidad de 10.000 rpm. durante 2 minutos con un homogenizador (Ultraturrax, IKA, USA). La emulsión obtenida se fraccionó en tubos Eppendorf de 1,5 mL y se almacenó a -20 °C hasta su uso.

4.2. Caracterización de las materias primas

Tanto al suero de leche dulce como al jugo de manzana natural obtenidos anteriormente se les determinó su pH mediante pH-metro (modelo PP 203, LAB-TEC) y contenido de sólidos solubles (°Brix) mediante un refractómetro digital (modelo HI96801, Hanna Instruments). La densidad se estimó mediante la relación masa/volumen utilizando material volumétrico de vidrio, específicamente matraz aforado de 25 mL, en una balanza analítica (GR-200, A&D Company). Los resultados fueron expresados como el promedio \pm desviación estándar de al menos tres réplicas. Se determinaron, además, recuento de aerobios mesófilos (RAM)

mediante siembra en superficie con agar para recuento en placa (APC), e incubación a 38°C por 48 h, coliformes totales y *Escherichia coli*, mediante siembra en placas de Petrifilm™ (3M™, USA). Estos resultados fueron comparados con los requisitos microbiológicos del Artículo 173 del RSA del Ministerio de Salud y todos los análisis se realizaron por triplicado.

4.3. Secado en capa fina de pomasa de manzana

Dentro del proceso de estudio todas las variables fueron medidas en triplicado

4.3.1. Determinación de la humedad inicial (H_0)

Se determinó el contenido de humedad inicial de nueve muestras de pomasa de manzana (*Royal Gala*) según la norma chilena NCh 841. Para ello se pesaron 5 g. de la muestra en una balanza analítica (m_1) y se llevó a estufa a una temperatura de 105°C durante 5 h. Después, se pesó la muestra hasta registrar peso constante, este valor se registró como el peso seco de la muestra (m_2). Con estos datos se determinó el porcentaje de humedad inicial (%) de cada muestra según la Ecuación 3.

$$H_0 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \text{ (Ec. 3)}$$

Donde H_0 es la humedad inicial de la muestra en porcentaje, m_1 el peso de la muestra antes de entrar en la estufa y m_2 es el peso seco de la muestra.

4.3.2. Deshidratación de pomasa de manzana

El proceso de secado se realizó mediante secado por ventana de refractancia (RW), para ello se colocaron 250 g. de pomasa de manzana, esparcidas con un espesor de 3 mm, sobre una bandeja construida con film de Mylar de 15x20 cm. (Figura 10)

Durante el proceso se registró cada 15 minutos el peso de las muestras en una balanza analítica y también la temperatura de la pomasa de manzana para determinar rangos de T° deseados, eficiencia de los procesos RW, conocer como la variación de temperaturas pueden afectar significativamente la calidad del producto y los resultados del experimento RW. Este registro permitirá además correlacionar los datos obtenidos con las condiciones térmicas. La medición de temperaturas se determinó utilizando un detector de temperatura infrarroja (GIS 500, Bosch). Las temperaturas de los tratamientos RW aplicadas fueron 70°C , 80°C y 90°C . Los tiempos de secado se registraron hasta conseguir una humedad fija de alrededor de 10 %. Las muestras se almacenaron en bolsas de propileno selladas hasta su análisis.

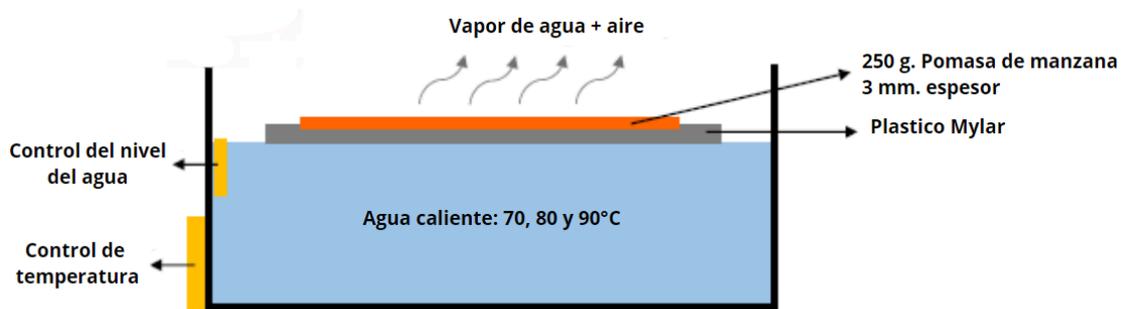


Figura 11. Configuración experimental del secado RW.
Fuente: Adaptado de Puente-Díaz et al., (2020)

4.3.3. Cálculo de la razón de humedad (MR)

Los resultados de humedad se expresaron como razón de humedad (MR) adimensionalizada en el tiempo, según la Ecuación (4).

$$MR = \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde MR es la razón de humedad adimensionalizada, H_t la humedad en el tiempo t , H_0 la humedad inicial y H_e la humedad de las muestras para la condición de equilibrio.

4.3.4. Construcción de cinéticas de secado RW

Para el estudio de la cinética durante los procesos de secado se construyeron gráficos de las curvas de secado MR versus tiempo, y también curvas de velocidad de secado $\partial MR/\partial t$ versus tiempo, donde MR se calculó con la Ecuación (4), con la información obtenida de la humedad de las muestras en el tiempo del secado.

4.3.5. Cálculo de difusividades efectivas (*Def*)

El coeficiente de difusividad efectiva fue obtenido utilizando la solución de la segunda ley de Fick para película infinita, mediante el método de las pendientes, utilizando una regresión lineal de la razón de humedad (MR) utilizando la Ecuación 5

$$MR = \frac{8}{\pi^2} e^{(-Def \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 t^\alpha)} / x \text{ Ln} \Rightarrow \text{Ln}(MR) = \text{Ln} \frac{8}{\pi^2} - Def \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 t^\alpha \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde MR es la razón de humedad, *Def* es el coeficiente de difusividad efectiva $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ L es el espesor del sólido (m), t el tiempo de secado (s). El valor del parámetro α depende del material y define el proceso de difusión como sub difusivo para $0 < \alpha < 1$, como súper difusivo para $\alpha > 1$ y $\alpha = 1$ para segunda ley de Fick

4.3.6. Cálculo de energía de activación (*Ea*)

La energía de activación fue obtenida a partir de la ecuación de Arrhenius, utilizando el *Def* obtenido y relacionándolo con la temperatura y la constante universal de los gases $R = 8,314 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$ mediante la Ecuación (6)

$$Def = D_0 e^{-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T}\right)} / x \text{ Ln} \Rightarrow \text{Ln} (Def) = \text{Ln} D_0 - \frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (\text{Ec. 6})$$

4.3.7. Modelamiento matemático de las cinéticas de secado

Se utilizaron los modelos de secado semi-teóricos exponenciales Newton/ Lewis, Henderson y Pabis, Page, Page Modificado y el modelo empírico de Weibull para describir las cinéticas de secado. La razón de utilizar los cuatro modelos semi teóricos es debido a que derivan de la ley de enfriamiento de Newton aplicada a la transferencia de masa, con esta ley las condiciones son isotérmicas y la resistencia a la transferencia de humedad se limita únicamente a la superficie del producto, mientras que la razón del uso del modelo empírico exponencial Weibull es para considerar también un escenario donde existan incertidumbres y/o variabilidad. Los modelos utilizados se muestran en la siguiente Tabla 6.

Tabla 6. Modelos matemáticos de secado utilizados experimentalmente.

Nombre	Ecuación	Desarrollador	Nacionalidad	Ref. original
Newton/ Lewis	$MR = 1 - e^{-kt}$ (Ec. 7)	Gilbert Newton Lewis	Estadounidense	(Lewis, 1921)
Henderson & Pabis	$MR = ae^{-kt}$ (Ec. 8)	Silas Milton Henderson/ Stanislaw Pabis	Estadounidense/ Polaco	(Henderson & Pabis, 1961)
Page	$MR = e^{-kt^n}$ (Ec. 9)	Glen E. Page	Estadounidense	(Page, 1949)
Page Modificado	$MR = e^{-(kt)^n}$ (Ec. 10)	Douglas Overhults	Estadounidense	(Overhults et al., 1973)
Weibull	$MR = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}$ (Ec. 11)	Ernst Hjalmar Waloddi Weibull	Sueco	(Weibull, 1951)

Los parámetros en los modelos matemáticos de la Tabla 6 descritos por las Ecuaciones (7-11). Se obtuvieron mediante procedimientos de regresión no lineal con la herramienta Solver de Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond,

Washington, EE UU) utilizando el método de ajuste de curvas de mínimos cuadrados. Posteriormente los modelos fueron evaluados y comparados mediante el coeficiente de determinación, prueba chi-cuadrado, y la raíz del error cuadrado medio, según las Ecuaciones 12 → 14. Los modelos con los valores más bajos de RMSE, χ^2 , junto con los más altos de R^2 se consideraron como óptimos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{experimental,i} - MR_{predicho,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{experimental} - MR_{predicho,i})^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{experimental,i} - MR_{predicho,i})^2}{N-z} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{experimental,i} - MR_{predicho,i})^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

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 (Inyang et al., 2018; Zhang et al., 2016)

4.4. Molienda y tamizado

Las muestras secas después de recibir los tratamientos RW fueron cortadas en trozos pequeños de forma cuadrada de 2x2 cm. Luego los trozos fueron insertados de uno en uno en la entrada de un molino ultracentrífugo (RETSCH ZM 200), donde fueron pulverizados a una velocidad de 1.000 rpm. Posteriormente las muestras secas y pulverizadas fueron tamizadas con tamiz malla N° 35 (serie fina ASTM E-11), abertura de malla 500 um (D = 500 um), 203 mm (8 in) de diámetro con tela de alambre de tejido de acero inoxidable. El tamaño de partícula (X), superficie (Xs) y volumen (Xv) fueron informados de acuerdo a lo establecido por la Norma ISO

9276-Representación de resultados del análisis del tamaño de partículas, utilizando las Ecuaciones 15→16

$$Xs = 4\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (\text{E.c 15}) \qquad Xv = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad (\text{Ec. 16})$$

4.5. Medición de color

La determinación del color se realizó mediante el análisis de imágenes por visión computarizada. Para ello se utilizó una cámara fotográfica (Canon Powershot Sx500 Is). Las tomas se realizaron en un habitáculo experimental de 45x45 cm con iluminación y distancia de captura uniforme. El tiempo de exposición utilizado fue de 1/5 y el diámetro de apertura del lente 3.4. Las imágenes obtenidas fueron analizadas cuantitativamente mediante el software Adobe Photoshop 2023 utilizando su herramienta de análisis de color para obtener los valores de los parámetros de color en el espacio CieLab: *(Luminosidad), a* (rojo-verde) y b* (amarillo-azul) tomando 5 puntos distintos representativos de las muestras analizadas. Con los valores L*a*b* se calculó el cambio de color (ΔE), el índice de pardeamiento (BI), y el índice de blancura (WI), según las siguientes Ecuaciones 17 →19

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$BI = \frac{(x-0,31)}{0,17} \quad \text{con} \quad x = \frac{(a^* + 1,75L^*)}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde L*, a* y b* representan las coordenadas de color.

4.6. Determinación de compuestos bioactivos

Previamente para obtener la muestra se realizó una extracción hidroalcohólica, donde se depositó 1 g de las muestras secas tamizadas que recibieron los tratamientos, al

interior de tubos Falcon de 50 mL + 10 mL solución de etanol al 90%. Los tubos fueron forrados con papel aluminio para protegerlos del paso de la luz y fueron llevados a una estufa a 37,5 °C donde permanecieron durante 4 horas en oscuridad y con agitación magnética de 400 rpm. Transcurridas las 4 horas de extracción hidroalcohólica se recogió el líquido sobrenadante que contenía la muestra a analizar.

4.6.1 Determinación del contenido de polifenoles totales

El contenido de polifenoles totales se cuantificó espectrofotométricamente a 765 nm. de acuerdo a la medición por reacción de Folin-Ciocalteu según método descrito por Singleton y Rossi (1965). Se determinó el contenido de polifenoles a las muestras de pomasa de manzana húmeda y secas (antes y después de recibir los tratamientos. Para este fin se construyó una curva patrón con ácido gálico y se utilizó dicha curva para la interpolación de los resultados obtenidos. El cálculo se expresó en base seca, y se utilizó la siguiente Ecuación 20.

$$\text{Polifenoles totales} \left[\frac{\text{mg EAG}}{\text{g base seca}} \right] = \frac{\rho_t * \frac{10}{M_t^e}}{1-x^w} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde ρ_t es la concentración de polifenoles en equivalente de ácido gálico (EAG) obtenida de la curva de calibración, M_t^e es la masa de pomasa de manzana homogeneizada utilizada en el extracto y x^w es la humedad de la manzana

4.6.2 Determinación de la capacidad antioxidante total

La capacidad antioxidante se determinó mediante el radical libre DPPH y cuantificó espectrofotométricamente a 517 nm según el método descrito por Brand-Williams et al, (1995). Se determinó la capacidad antioxidante a las muestras de pomasa de manzana húmedas y secas. Para este fin se construyó una curva de calibración con el

estándar Trolox y se utilizó dicha curva para la interpolación de los resultados obtenidos. El cálculo se expresó en base seca, y se utilizó la siguiente Ecuación 21.

$$\text{Capacidad antioxidante} \left[\frac{\mu\text{mol ET}}{\text{g base seca}} \right] = \frac{\mu_t * \frac{10}{0,1 * M_t^e}}{1 - x^w} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde μ_t es la capacidad antioxidante en equivalentes de trolox (ET) obtenida de la curva de calibración, M_t^e es la masa de manzana homogeneizada utilizada en el extracto y x^w es la humedad de la pomasa de manzana

4.7. Diseño de formulaciones de bebidas proteicas saludables

Las formulaciones se elaboraron utilizando contenidos entre 60-80 mL de suero, entre 20-40 mL de jugo y entre 1,5-2,5 g. de pomasa deshidratada y tamizada. Se tomaron contenidos de bebidas de 20 mL jugo + 80 mL suero, 30 mL jugo + 70 mL suero, 40 mL jugo + 60 mL suero, para obtener mezclas de bebidas de 20, 30 y 40% v/v respectivamente. Donde el %v/v de la mezcla de bebida proviene de la relación del cociente entre el volumen del jugo (soluto en menor cantidad) y el del suero (solvente en mayor cantidad) mientras que el %m/v proviene de la relación del cociente entre la masa de la pomasa de manzana (soluto) y el volumen de la disolución (jugo + suero). Lo anterior puede describirse mediante las Ecuaciones:

$$\% m/v = \frac{\text{solute (g)}}{\text{disolución (mL)}} \times 100 \Rightarrow \text{Pomasa} = \frac{\text{pomasa de manzana (g)}}{\text{jugo (mL) + suero (mL)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 22})$$

$$\% v/v = \frac{\text{solute (mL)}}{\text{disolución (mL)}} \times 100 \Rightarrow \text{Mezcla} = \frac{\text{jugo (mL)}}{\text{jugo (mL) + suero (mL)}} \times 100 \quad (\text{Ec. 23})$$

A cada mezcla de bebida se le agregó una cantidad fija de 0,75 mL de emulsión de cinamaldehído, y 2,5 g de concentrado de proteína de suero (Lactoprin 80, Prinal, Chile). Los ingredientes se homogeneizaron con la ayuda de un mixer minipimer

(Blaupunkt, Alemania) incorporando agitación a alta velocidad durante 2 minutos. Se decidió evaluar la utilización de un mixer doméstico para facilitar la transferencia de la tecnología a pequeños productores queseros artesanales. Las distintas formulaciones elaboradas se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Composición de las formulaciones de bebidas proteicas

Formulación	Variables experimentales		Variables fijas	
	Mezcla de bebida (%)	Pomasa de manzana (g)	Aislado de Proteína (g)	Cinamaldehído emulsión (mL)
F1	40	1,5	2,5	0,75
F2	40	2,0	2,5	0,75
F3	40	2,5	2,5	0,75
F4	30	1,5	2,5	0,75
F5	30	2,0	2,5	0,75
F6	30	2,5	2,5	0,75
F7	20	1,5	2,5	0,75
F8	20	2,0	2,5	0,75
F9	20	2,5	2,5	0,75

4.9. Caracterización de las formulaciones de bebidas lácteas

Dentro del estudio de bebidas lácteas todas las variables fueron medidas en triplicado

4.9.1. Determinación de color de las formulaciones de bebidas

A través del análisis y medición de color utilizando el mismo método que en la sección 4.4. Además, se incorporó la cromaticidad C^* y el ángulo de tono H° para garantizar una reproducción precisa y consistente de colores, utilizando las Ecuaciones (22-23). Para las tomas del análisis y medición de color se utilizaron

tubos transparentes de vidrio de 50 mm de diámetro sobre papel de alta blancura para crear un entorno que no afectara el color por diferencias en el tono y la luminosidad.

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (\text{Ec. 24}) \qquad H^\circ = \tan^{-1} \frac{(b^*)}{(a^*)} \quad (\text{Ec. 25})$$

4.9.2. Determinación de pH

Utilizando el mismo método que en la sección sección 4.2.

4.9.3. Determinación del contenido de sólidos solubles (°Brix)

Utilizando el mismo método que en la sección 4.2.

4.9.4. Determinación de contenido de polifenoles totales

Utilizando el mismo método que en la sección 4.6.1 con el resultado expresado con unidades de volumen, es decir, expresados en [mg EAG/ 100 mL]

4.9.5. Determinación de capacidad antioxidante total

Utilizando el mismo método que en la sección 4.6.2. con el resultado expresado con unidades de volumen, es decir, expresados en [u.mol ET/100 mL]

4.9.6. Determinación de contenido de proteínas

El contenido de proteínas se cuantificó espectrofotométricamente a 595 nm. según método descrito por Bradford (1976). Para este fin se construyó una curva de calibración con el estándar BSA y se utilizó dicha curva para la interpolación de los resultados obtenidos, expresados en [g BSA/100 mL].

4.10. Optimizaciones de las variables de respuesta

Las formulaciones fueron optimizadas mediante metodología superficie de respuesta en el programa estadístico StatGraphics 19. Los factores experimentales fueron las 2 variables experimentales ($k = 2$), mezcla de bebida (% v/v) y la pomasa de manzana (% m/v), con 3 niveles cada uno (-1,0,1). Por consiguiente, se utilizó un modelo cuadrático, factorial de 3 niveles y 2 factores experimentales, con 2 puntos centrales situados al final (uno por cada factor experimental), no aleatorio, es decir, diseño factorial $3^2 + 2$ no aleatorizado. El diseño se muestra en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8. Diseño de experimentos para bebidas lácteas

Experimento	A: Mezcla de bebida (%)	B: Pomasa de manzana (%)
1	-1(20)	-1(1,5)
2	0(30)	-1(1,5)
3	1(40)	-1(1,5)
4	-1(20)	0(2,0)
5	0(30)	0(2,0)
6	1(40)	0(2,0)
7	-1(20)	1(2,5)
8	0(30)	1(2,5)
9	1(40)	1(2,5)
10	0(30)	0(2,0)
11	0(30)	0(2,0)

*Variables codificadas y discretas.

Los objetivos de la optimización fueron maximizar los compuestos bioactivos con efectos beneficiosos para la salud, maximizar el dulzor a través de la maximización del contenido de sólidos solubles, con el fin de evitar el uso de edulcorantes, además, maximizar el contenido de proteínas, y minimizar el pH de la bebida láctea. El diseño

se realizó con una sensibilidad media para cada variable de respuesta (pH, sólidos solubles, contenido de polifenoles, capacidad antioxidante, proteínas) de manera individual, y luego se realizó para múltiples respuestas, donde se consideraron aquellas variables de respuestas que mostraron significancia estadística en los análisis de diseños individuales ($p < 0,05$) y un coeficiente de determinación $R^2 > 70\%$.

4.11. Procedimiento del etiquetado nutricional según RSA y ley 20.606

Para la confección del etiquetado nutricional se hizo la evaluación de sellos de advertencia, según el RSA y la ley 20.606 para determinar si corresponde o no la aplicación de ellos. Además, se recolectó datos nutricionales sobre los nutrientes, grasa (g), sodio (mg) y fibra dietética (g), a partir de los informados en la Base de datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2023). Los azúcares totales (g) y proteínas (g) se obtuvieron a partir de los resultados de la caracterización para la formulación óptima de °Brix y % Proteínas, mediante los métodos descritos en la sección 4.2 y 4.9.6, respectivamente, mientras que los hidratos de carbono disponibles (g) se obtuvieron a partir de la suma de azúcares totales y almidones digeribles. Posteriormente, se calculó el contenido calórico multiplicando los porcentajes de los nutrientes que aportan calorías por el calor de combustión. Los cálculos realizados para el etiquetado se detallan en el Anexo 1.

4.12. Análisis estadísticos

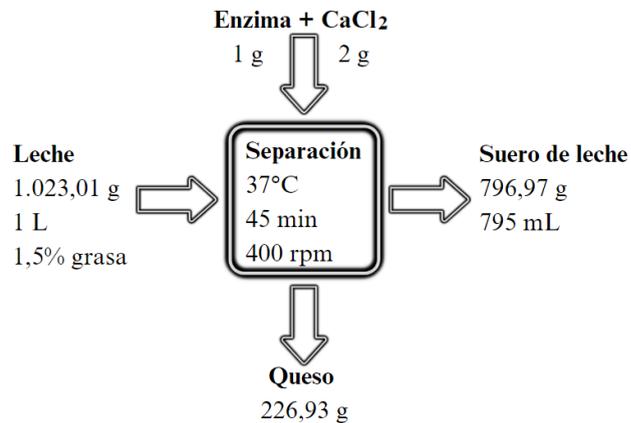
Para analizar los resultados se realizó análisis de varianza unidireccional (ANOVA). Las diferencias entre las medias se analizaron usando el método de las diferencias menos significativas (LSD) de Fisher con un nivel de significancia 5 % y un intervalo utilizando el software para el análisis estadístico Infostat versión 2020.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

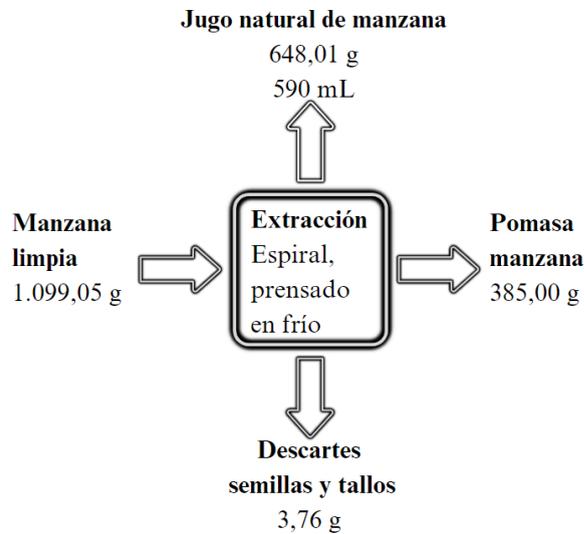
5.1. Obtención y caracterización de las materias primas.

5.1.1. Balances de materia

La Figura 12 muestra los balances de masa para el suero y jugo obtenidos.



A



B

Figura 12. Balance de masa de materias primas

En la Figura 12 A se observa que, a partir de la coagulación enzimática de 1 L de leche semidescremada UHT contenido grasa = 1,5%, en reacción con 1,00 g enzima coagulante y 2,00 g. CaCl₂, es posible obtener una masa de 226,93 g queso y 796,97 g

de suero de leche, equivalente a un volumen de 795 mL. Este resultado es mayor en comparación al obtenido en la coagulación enzimática reportada por Wedholm et al. (2008) quien informó una obtención de un máximo de 100,2 g queso a partir de 1.000 g leche (1 L aprox.). Esta diferencia se debe principalmente a diferencias en el tipo de leche desnatada con contenido graso = 0%, a diferencias en la enzima, quimosina con concentración $C = 1,25 \text{ mL/L}$, temperatura del medio de reacción, 30°C , tiempo de coagulación, $t = 30 \text{ min}$, y a la ausencia de la incorporación de CaCl_2 , una práctica industrial ampliamente utilizada, que favorece en gran medida el proceso de coagulación enzimática. En esa misma línea, Sandra et al. (2012) informó que la adición de cloruro de calcio a la leche tiene efectos positivos en la elaboración de queso porque disminuye el tiempo de coagulación, crea geles más firmes y aumenta el rendimiento de cuajada.

El rendimiento del proceso de separación obtenido es de 99,38 %. Es necesario e importante mencionar que este cálculo asume que en un proceso de elaboración de queso con un rendimiento $R = 100\%$, el 80% del volumen total de la leche utilizada corresponde al volumen del suero de leche.

En la Figura 12 B se observa que se obtuvieron, a partir de la extracción de 1099,05 g de manzana variedad Royal Gala, 648,01 g de jugo de manzana, equivalente a un volumen de 590 mL y 385,00 g de pomasa de manzana. Además, se obtuvieron 3,76 g de Descartes provenientes de tallos y semillas. Respecto a las semillas de manzana, estas son ricas en proteínas, aunque de valor nutricional relativamente bajo, fibra y aceite, que se pueden extraer de ellas, pero también pueden contener una cantidad significativa de sustancias nocivas, por ejemplo, amígdalina toxigénica. Al respecto Opyd et al. (2017) informó que la suplementación dietética con harina de semillas de manzana puede ejercer efectos beneficiosos sobre el tracto intestinal, el perfil de

lípidos en sangre y el estado antioxidante en ratas, y que, en la mayoría de los casos, estos efectos no están limitados por la presencia de amigdalina toxigénica.

En cuanto al rendimiento R obtenido de la extracción de jugo de manzana por prensado en frío, este fue de 90,92% (R = 90,92%). Este rendimiento es alto en comparación al reportado por Vizzotto et al. (2012), quien había informado un rendimiento R = 47 % para jugo de manzana Fuji, mediante este mismo método (prensado en frío) y otros, por ejemplo, cuchillas giratorias (R = 29,4%) y de cubierta superior cónica (R = 38,4%), muy similar a las de los vendedores callejeros de jugo de naranja natural en la comuna de Independencia, en Santiago de Chile.

5.2. Caracterización de materias primas

La Tabla 9 muestra la caracterización del suero y el jugo de manzana obtenidos

Tabla 9. Resultados de la caracterización de materias primas

Parámetro	Suero de leche	Jugo de manzana natural
Densidad [$\frac{g}{ml}$]	1,014 ± 0,003	1,053 ± 0,011
pH	6,80 ± 0,06	3,94 ± 0,02
Sólidos solubles [°Brix]	4,67 ± 0,06	13,63 ± 0,06
RAM [$\frac{UFC}{ml}$]	2,9 x 10 ²	1,0 x 10 ¹
Coliformes [$\frac{UFC}{ml}$]	5,0 x 10 ¹	Ausencia
<i>E. coli</i> [$\frac{UFC}{ml}$]	Ausencia	Ausencia

A partir de la Tabla 9 se puede observar que el suero obtenido tiene una densidad D = 1,014 g/mL, este es comparable al informado por Pombo et al. (2022) para suero dulce procedente de leche entera D = 1,028 g/mL, y leche desnatada D = 1,029 g/mL.

Las muestras de suero analizadas tienen un pH promedio = 6,80, este valor está dentro del rango de pH = 5,83 - 6,92 de la caracterización de suero dulce informado por Whetstine et al. (2005), es superior al pH = 6,17 informado por Gimhani and Liyanage (2019) y cercano al pH = 6,52 informado por Pombo et al. (2022).

El contenido de sólidos solubles (SS) obtenido es SS = 4,67 °Brix, esto significa que hay 4,67 gramos de sacarosa disueltos en 100 gramos del suero dulce obtenido. Este resultado es inferior a SS = 7,0 °Brix, informado por Gimhani and Liyanage (2019) e inferior al rango SS = 6,48 - 7,04, informado por Pombo et al. (2022).

Respecto a los resultados microbiológicos del suero obtenido estos tienen un valor RAM = $2,9 \times 10^2$ UFC/mL, Coliformes = $5,0 \times 10^1$ UFC/mL y ausencia de *E. coli*. Estos resultados microbiológicos son comparables y congruentes a la caracterización microbiológica del suero de leche informado por Mavropoulou & Kosikowski (1973) quien informó un rango para RAM = 4 - 2300 UFC/mL, Coliformes > 1 UFC/mL, y un valor menor a 1 UFC/mL para *E. coli* (*E. coli* < 1 UFC/mL). Al revisar el RSA no es posible comparar directamente estos resultados, ya que el RSA no define requisitos de ningún tipo para el suero de leche. El RSA sólo considera a los productos terminados, y el suero de leche no está dentro de esta categoría de productos. Sin embargo, para efectos de comparación, se encuentran disponibles en el RSA los requisitos para leches y cremas pasteurizadas (con o sin saborizante), cuyos límites máximos permitidos son $5,0 \times 10^4$ UFC/mL para RAM y $1,0 \times 10^1$ UFC/mL para Coliformes. Considerando estos límites, el suero de leche dulce obtenido cumple con los límites máximos permitidos para RAM, pero no para Coliformes, según el Artículo N° 173 del RSA.

En relación al jugo de manzana natural obtenido, tiene una densidad $D = 1,053 \text{ g/mL}$, este resultado es muy cercano con los resultados obtenidos por otros autores, por ejemplo, Żywica y Banach (2019) informó la densidad de los jugos de manzana natural en el rango $D = 1,034 - 1,051 \text{ g/mL}$, Kobus et al. (2018) entre $D = 1,034 - 1,041 \text{ g/mL}$, y Nadulski et al. (2014) entre $D = 1,028 - 1,052 \text{ g/mL}$.

Respecto al pH, las muestras de jugo de manzana analizadas tienen en promedio un $\text{pH} = 3,94$, es decir, Ácido ($\text{pH} = 4,5 - 3,7$) y por lo tanto es un medio desfavorable para el crecimiento de microorganismos. Anteriormente Kim et al. (2018) informó que la capacidad de respuesta del crecimiento bacteriano a 25°C después de 48 h de incubación, en bebidas de jugo de manzana con $\text{pH} = 4,0$ y también en bebidas deportivas Gatorade con electrolitos y $\text{pH} = 3,1$ presentan una población de especies bacterianas *B. cereus*, *E. coli O157:H7*, *L. monocytogenes* y *S. aureus* inferior a $3,0 \log \text{ UFC/mL}$. Es necesario e importante mencionar que el pH de los jugos de manzana está influenciado por la variedad, la fecha de recolección de la manzana, el método de obtención y el procesamiento posterior de los jugos (Rydzak et al., 2020). Otros autores informaron resultados similares, por ejemplo, Karaman et al. (2020) determinó que los valores de pH para jugo de manzana oscilaban entre $\text{pH} = 3,34 - 3,68$ y Nadulski et al. (2016) informó entre $\text{pH} = 3,39 - 3,77$.

Respecto al contenido de sólidos solubles encontrado este se midió en $\text{SS} = 13,63$ °Brix, es decir, hay $13,63 \text{ g}$ de sacarosa disueltos en 100 g de jugo de manzana natural. Los resultados microbiológicos son $1,0 \times 10^1 \text{ UFC/mL}$ para RAM y “Ausencia” para Coliformes y *E. coli*. En este caso (a diferencia del suero de leche) el RSA si establece requisitos microbiológicos para jugos de manzana, en su categoría de “zumos, néctares, bebidas a base de frutas y verduras no pasteurizadas”, cuyos

límites máximos permitidos son $1,0 \times 10^5$ UFC/mL para RAM y $1,0 \times 10^2$ UFC/mL para *E. coli*. Considerando estos límites, el jugo de manzana obtenido cumple con los límites máximos para RAM y *E. coli* del Artículo 173 del RSA.

5.3. Secado en capa fina de la pomasa de manzana por RW70, RW80 y RW90

5.3.1. Curvas de secado RW

Las curvas de secado RW 70/80/90 se muestran en la siguiente Figura 13.

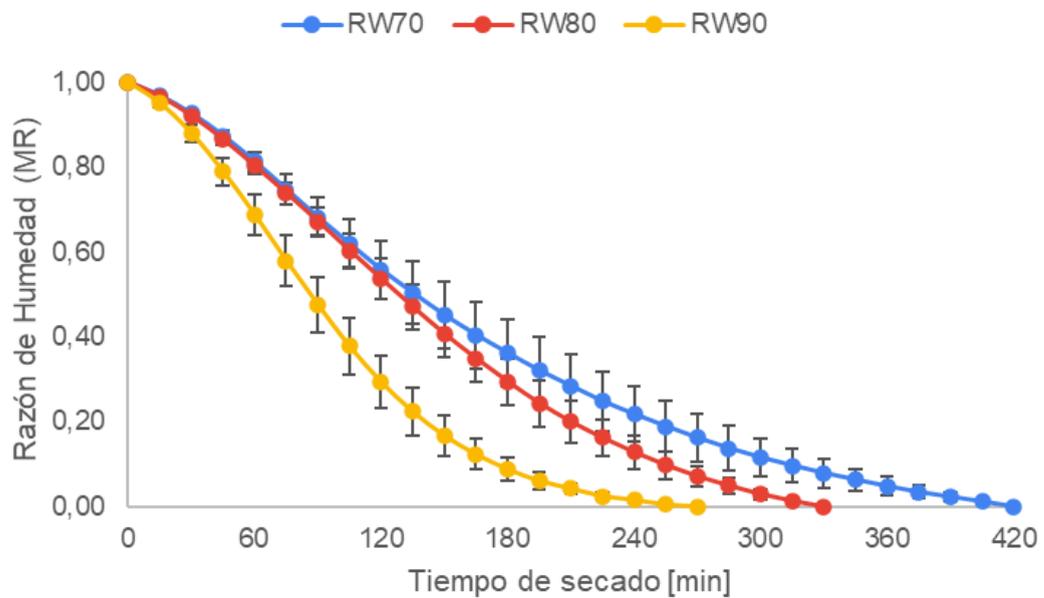


Figura 13. Curvas de secado RW de pomasa de manzana
Barras de error verticales = Desviación estándar

Se observa que las curvas de secado RW70, RW80 y RW90 alcanzaron la humedad de equilibrio en tiempos de secado en 420 min, 330 min y 270 min, respectivamente. El tiempo de secado disminuyó 90 minutos ($\Delta t = 21,43\%$) cuando se aumentó la temperatura del medio de calentamiento (agua) del proceso de secado desde 70°C a 80°C , y disminuyó 150 minutos ($\Delta t = 35,71\%$), cuando se aumentó de 70°C a 90°C . Nguyen et al. (2022) previamente también observaron disminuciones en los tiempos

de secado RW para pulpa mango (*Mangifera indica*) ($\Delta t = 47,06\%$) al aumentar la temperatura de 80°C a 95°C. También Rajoriya et al. (2021) notó una reducción en el tiempo de secado por RW de pomasa de plátano (*Musa acuminata*) cuando la temperatura aumentó de 70°C a 80°C ($\Delta t = 38,9\%$) y de 70°C a 90°C ($\Delta t = 61,1\%$), evidenciándose que, a mayor temperatura, menor es el tiempo de secado requerido para alcanzar la humedad de equilibrio en las muestras. Esto podría explicarse por el mayor gradiente de temperatura que se genera entre la fuente de calor (agua) y las muestras de pomasa de manzana, lo cual favorece una rápida eliminación de agua desde las muestras húmedas, debido al aumento en la transferencia de calor como consecuencia del aumento de temperatura. Anteriormente, Rajoriya et al. (2019) informó que el aumento de la temperatura en secado RW de rodajas de manzana Red Delicious aumenta la densidad de radiación y la tasa de transferencia de calor, lo que a su vez aumenta la tasa de eliminación de humedad.

Respecto a la cinética de las curvas RW se observa que RW70, RW80 y RW90 tienen forma de curva cóncava al comienzo del secado, después lineal o constante en el medio, y finalmente convexa, lo que supone la existencia de una fase de calentamiento, velocidad constante y de velocidad decreciente, respectivamente, muy similar a las de la Figura 9. Se observa, además, que la fase predominante del secado RW de pomasa de manzana es la fase decreciente, esto significa que el secado de pomasa de manzana Royal Gala es gobernado por esta fase.

Por otro lado, la humedad crítica en RW70, RW80 y RW90 se alcanza en los tiempos $t = 90$ min, 105 min y 75 min, respectivamente. A su vez, en estos tiempos, se alcanzan las velocidades de secado más altas de cada secado, siendo estas de $4,37 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, $4,58 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ y $7,21 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ para RW70, RW80 y RW90, respectivamente. Estos resultados evidencian que las velocidades de secado más altas

se alcanzan cuando los contenidos de humedad son altos todavía, es decir, antes de la humedad crítica). El análisis de las velocidades se muestra en la sección 5.3.2.

5.3.2. Análisis de velocidades de secado RWS

Las curvas de velocidad RWS 70/80/90 se muestran en la siguiente Figura 14.

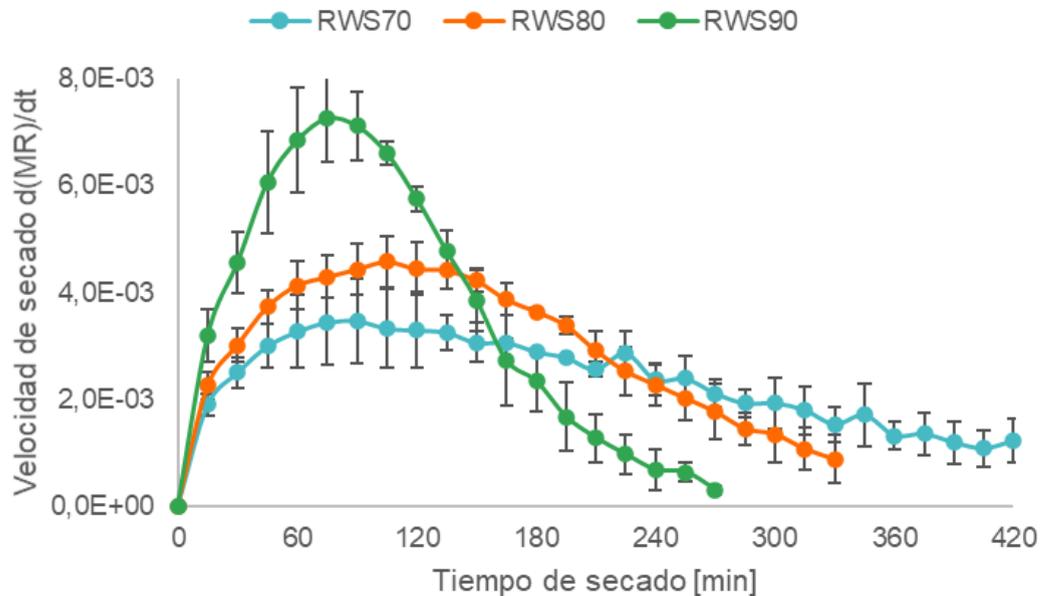


Figura 14. Curvas de velocidades de secado RWS a distintas temperaturas
Barras de error verticales = Desviación estándar

En la Figura 14 se observa que en los primeros 15 minutos de secado las velocidades de secado de las curvas se incrementaron de 0 min^{-1} a un rango entre $2,12 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ y $3,30 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. En estos primeros 15 min del proceso de secado, la velocidad de secado de RWS90 es 1,56 veces más grande que la velocidad de secado de RWS70, además es 1,47 veces mayor que la velocidad de secado de RWS80. En los próximos 60 minutos, hasta $t = 75 \text{ min}$ del proceso, las velocidades de secado observadas para RWS70 ascienden a $4,37 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, las RWS80 ascienden sucesivamente a $4,29 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ y las de RWS90 ascienden a $7,21 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Para este instante $t = 75 \text{ min}$ la velocidad observada para RWS90 es 1,68 veces mayor que la velocidad de secado de RWS80 y 1,65 veces mayor que la velocidad de secado de RWS70. Esto significa que

RWS90 alcanzó una velocidad de secado $\partial MR/\partial t$ en promedio 1,61 y 1,58 veces mayor, respectivamente. A partir de este instante, $t = 75$ min, la curva RWS90 comienza la fase de velocidad decreciente, mientras que las curvas RWS70 y RWS80 aún continúan en ascenso. Esto significa que RWS90 alcanzó la condición crítica de humedad y por tanto la humedad de la pomasa se ha reducido significativamente. Por el contrario, las curvas RWS70 y RWS80 aún no comienzan a descender, y por lo tanto todavía contienen una cantidad significativa de humedad.

Una observación importante en este análisis se revela cuando se intenta visualizar la fase de velocidad constante, observándose que es demasiado breve y/o inexistente. Anteriormente, Nguyen et al. (2022) informó que para el secado RW de pulpa de mango el proceso sólo ocurrió en el período de tasa decreciente, con el período de tasa constante indetectable. La Figura 14 además muestra que las velocidades de la curva RWS70 fueron relativamente constantes en los tiempos de secado cercanos a los 90 minutos, mientras que los de RWS80 entre los instantes $t = 90$ min y 120 min, en el de RWS90 se observa, que esta fase es inexistente. En base a estos resultados presentados, se observa que la fase de velocidad constante es difícil de determinar y/o comprobar su existencia. Anteriormente Berk (2018) informó que este fenómeno se debe a que las condiciones requeridas para un secado a velocidad constante rara vez se cumplen.

En relación a las fases de velocidades decrecientes, estas se desarrollaron entre $t = 90$ min y 420 min. ($\Delta t = 330$ min.), $t = 105$ min y 330 min ($\Delta t = 225$ min) y $t = 70$ min y 270 min ($\Delta t = 195$ min) para las curvas RWS70, RWS80 y RWS90, respectivamente, es decir, permanecieron en esta fase el 78,57%, 68,18% y 72,22%, equivalente a un promedio de permanencia del 73% del tiempo total. Esto significa que el secado está dominado principalmente por la fase decreciente. Para terminar esta sección, se

observa que las velocidades más bajas se observaron en los tiempos de término de cada proceso, justamente cuando los contenidos de humedad de las muestras están alcanzando la humedad de equilibrio, y su contenido de humedad es mínimo.

5.3.3. Análisis del perfil de temperaturas RWT

Las curvas de temperaturas RWT 70/80/90 se muestran en la siguiente Figura 15.

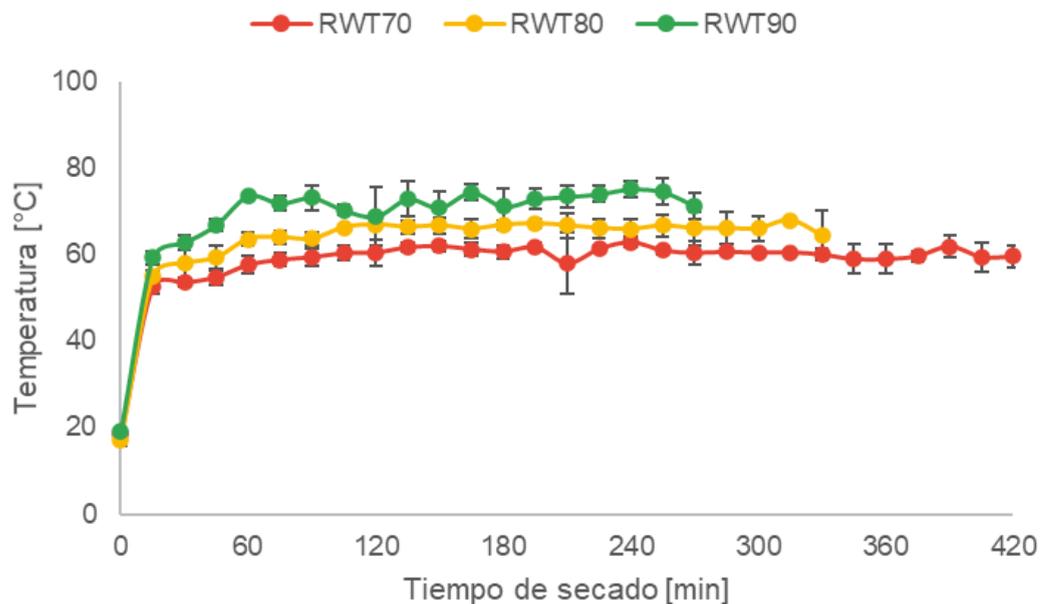


Figura 15. Curvas del perfil de temperaturas RWT en pomasa de manzana
Barras de error verticales = Desviación estándar

En la Figura 15 se puede observar que las curvas de temperaturas aumentan en promedio desde 18 °C hasta 56°C en los primeros 15 min, a una tasa de calentamiento $\partial T/\partial t = 2,28 - 2,68$ °C/min. Esto significa que la fase de calentamiento ocurre principalmente en este intervalo de tiempo. Rajoriya et al. (2021) señala que el rápido aumento de la temperatura en las etapas iniciales del secado RW se atribuye a un mayor gradiente de temperatura (ΔT) entre la pomasa y el medio de calentamiento (agua). Esta ΔT actúa como una fuerza impulsora para la transferencia de calor durante el proceso de secado RW. En efecto, en los siguientes 45 min posterior a la fase de calentamiento, es decir en el intervalo de 15 min a 60 min, las temperaturas de

las curvas continúan aumentando, pero paulatinamente en comparación a los primeros 15 min. Las nuevas tasas reducidas de calentamiento en este intervalo de tiempo varían entre 0,11 - 0,32 °C/min, mientras que las temperaturas alcanzadas para el término de este intervalo de tiempo son 58°C, 64°C y 74°C, para RWT 70/80/90 respectivamente. Anteriormente, este mismo comportamiento en el alza de las temperaturas, aumento rápido - lento, había sido reportado por Rajoriya et al. (2019) en el secado por RW a $T = 60^{\circ}\text{C} \rightarrow 90^{\circ}\text{C}$ en manzana Red Delicious. A partir del instante $t = 60$ min, hasta el tiempo de término de cada proceso de secado las tasas de calentamiento tienden a valores positivos $+\partial T/\partial t$ y negativos $-\partial T/\partial t$, cercanos a 0, por encima de 0, $\partial T/\partial t \rightarrow 0^+$ y también por debajo, $\partial T/\partial t \rightarrow 0^-$. En consecuencia, las temperaturas de la pomasa también fluctúan, y lo hacen entre mínimos y máximos de 58°C y 63°C; 64°C y 68°C; 69°C y 75°C para RWT70/80/90 respectivamente, siendo las temperaturas promedias que se mantuvieron para cada caso de 60°C, 66°C y 73°C. Esto significa que la temperatura final fue en promedio de 10°C a 17°C más baja que la establecida en el secador. Estos resultados son comparables a los informados para secado por RW de pomasa de plátano (*Musa acuminata*) por Rajoriya et al. (2021) donde la temperatura final alcanzada fue 64°C, 73°C y 82°C, siendo ellas entre 6 °C y 8 °C inferiores respecto de las temperaturas del agua en circulación (70°C, 80°C, 90°C). Las posibles razones de la menor temperatura podrían ser el efecto del enfriamiento por evaporación y del desarrollo de espacios de aire entre la pomasa y el film de Mylar, lo que conlleva a una disminución del flujo de calor total neto transferido Q_{neto} . Respecto a este desarrollo de espacios de aire mencionado en el punto anterior, dado que el agua es el principal conductor de calor con un coeficiente de conductividad térmica $\lambda = 0,599 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, a medida que avanza el secado el contenido de humedad disminuye y la evolución de la fase gaseosa

dentro del material, que está compuesta principalmente de aire, el cual es un mal conductor de calor con un coeficiente de conductividad térmica $\lambda = 0,0266 \text{ W/m}^\circ\text{K}$, avanza, lo que provoca una disminución de la conductividad térmica producto de un menor coeficiente de conductividad térmica λ en la sustancia conductora principal en este caso agua-aire. Aquí es importante observar que la transferencia de calor en la conducción térmica, es el resultado de una transferencia directa de energía entre partículas, como moléculas, átomos y electrones, con mayor energía y otras con menor energía. A diferencia de la transferencia de calor por radiación, que es transportada por ondas electromagnéticas, por ejemplo, transferencia de calor hacia la Tierra desde el Sol, y que también está presente en el secado RW, específicamente en las etapas iniciales del proceso de secado, cuando la humedad del producto alimenticio es Alta, en el vacío no hay conducción térmica (Polezhaev, 2011).

Las últimas temperaturas observadas para RW 70/80/90 fueron 60°C , 64°C y 71°C , respectivamente, esto comprueba que las temperaturas en la pomasa son inferiores a las del secador, esta diferencia de temperatura ΔT , como se mencionó anteriormente, podría deberse también a la evaporación de la humedad de la superficie, conocida en la literatura como *Efecto de enfriamiento por evaporación* que conduce a la eliminación de energía térmica de la superficie del producto (Nindo et al., 2003).

Los resultados obtenidos permiten pensar que el alza de la temperatura tiene ciertos límites en el caso de ventana de refractancia, y que estos límites cuidan aún más el material biológico frente a los efectos destructivos por parte de las altas temperaturas. Por último, se observa una reducción creciente en el tiempo de secado ($\Delta t = 21,43\%$ a $35,71\%$) con el aumento de temperatura desde 70°C a 80°C y 70°C a 90°C . Este aumento de temperatura ΔT se traduce en aumento de la energía térmica transferida (Calor Transferido = Calor específico agua x masa partículas agua x **variación**

temperatura) también conocida como energía calórica **Q**, lo que facilita la difusión y eliminación de la humedad del material a un ritmo más rápido (Rajoriya et al., 2021).

5.3.4. Difusividad efectiva y Energía de activación

A continuación, la Tabla 10 muestra los valores de difusividad efectiva y energía de activación obtenidas para el secado RW a distintas temperaturas

Tabla 10. Resultados de difusividad efectiva y energía de activación

Temperatura de secado (°C)	$D_{eff} \times 10^{-10} \left(\frac{m^2}{s}\right)$	R ² (%)	E _a (kJ/mol)	R ² (%)
70	1,48 ± 0,19 ^a	93,22	34,87	95,32
80	1,85 ± 0,22 ^a	89,75		
90	2,92 ± 0,19 ^b	92,52		

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los resultados de la Tabla 10 muestran que cuando la temperatura del secado RW aumenta desde 80°C a 90°C, la difusividad efectiva aumenta significativamente de $1,85 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $2,92 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, esto se debe a que el alza de temperatura en el agua de circulación generó un movimiento más rápido de las moléculas de agua del material biológico desde el interior hasta la superficie para evaporarse. Esto se explica debido a que el aumento de temperatura aumenta la transferencia de energía térmica hacia el material biológico, esto se traduce en una mayor movilidad de las moléculas de agua (Energía Cinética = $\frac{1}{2} \times \text{masa partículas agua} \times \text{velocidad}^2$) con lo cual la difusividad efectiva aumenta y/o disminuye la resistencia interna a la transferencia de materia. Estos resultados son muy similares a las difusividades efectivas del agua presentados en investigaciones de secados RW anteriores, por ejemplo, Bruinand y Luyben, (1978) para manzana Granny Smith ($D_{eff} = 1,15 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$); Rajoriya et al. (2019) para rodajas de manzana Red Delicious ($D_{eff} = 2,5 \times 10^{-10}$

$\text{m}^2/\text{s} \rightarrow 7,14 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$); Franco et al. (2019) para rodajas de manzana Granny Smith ($D_{\text{eff}} = 1,25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \rightarrow 14,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Es necesario e importante mencionar que los valores de D_{eff} informados en las investigaciones anteriores variaron debido al uso de diferentes temperaturas de secado, contenidos de humedad de la muestra, aplicación de pretratamientos y el espesor de Mylar™ (Puente-Díaz et al., 2020).

En relación a la energía de activación obtenida, esta fue de 34,87 kJ/mol. Esta energía corresponde a la energía mínima necesaria que debe poseer el agua para poder ser eliminada durante el proceso de secado de pomasa de manzana por RW realizado y representa una barrera energética que debe ser sobrepasada para que el proceso tenga lugar, es decir, cuanto mayor sea el valor de energía de activación en un alimento, mayor será la dificultad del mismo para deshidratarse. Este resultado es comparable a resultados de energía de activación informadas por Lemus et al. (2014) para secado de las hojas de estevia (*Stevia rebaudiana*) Bertoni ($E_a = 38,78 \text{ kJ/mol}$); Senadeera et al. (2003) para secado de judías verdes (*Phaseolus vulgaris*) ($E_a = 39,41 \text{ kJ/mol}$), papa (*Solanum tuberosum*) ($E_a = 14,34 \text{ kJ/mol}$) y para arvejas (*Pisum sativum*) ($E_a = 42,35 \text{ kJ/mol}$); Nguyen et al. (2022) para pulpa de mango (*Mangifera indica*) ($E_a = 66,03 \text{ kJ/mol}$); Mirzaee et al. (2009) para secado de albaricoque (*Rajabali*) ($E_a = 29,35 \text{ kJ/mol} \rightarrow 33,78 \text{ kJ/mol}$) y Doymaz (2007) para el secado con y sin pretratamiento de tomate (*Lycopersicon esculentum*) ($E_a = 17,40 \text{ kJ/mol} \rightarrow 32,94 \text{ kJ/mol}$). Por cierto, en la revisión de la literatura informada por Onwude et al. (2016), el rango de valores para difusividad efectiva fluctuó entre 10^{-10} y $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, cuando se trata de secado en capa fina de frutas y verduras, y la mayoría de las publicaciones presentaron energías de activación que oscilaban entre 14,42 y 43,26 kJ/mol, y muy pocos variaron de 78,93 kJ/mol a 130,61 kJ/mol.

5.3.5. Modelamiento matemático de las curvas de secado RW

A continuación, los parámetros cinéticos se muestran en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros cinéticos de los modelos matemáticos ajustados

Secado RW	Parámetros cinéticos*		Modelo matemático
RW70	$k = 5,8762 \times 10^{-3}$		<u>Newton</u> $MR = e^{-kt}$
RW80	$k = 6,5605 \times 10^{-3}$		
RW90	$k = 9,8827 \times 10^{-3}$		
RW70	$k = 6,5872 \times 10^{-3}$	$a = 1,1245$	<u>Henderson y Pabis</u> $MR = ae^{-kt}$
RW80	$k = 7,4888 \times 10^{-3}$	$a = 1,1435$	
RW90	$k = 1,1152 \times 10^{-2}$	$a = 1,1424$	
RW70	$k = 5,1538 \times 10^{-4}$	$n = 1,4629$	<u>Page</u> $MR = e^{-kt^n}$
RW80	$k = 1,9950 \times 10^{-4}$	$n = 1,6831$	
RW90	$k = 3,5557 \times 10^{-4}$	$n = 1,7004$	
RW70	$k = 5,6723 \times 10^{-3}$	$n = 1,4810$	<u>Page modificado</u> $MR = e^{-(kt)^n}$
RW80	$k = 6,3742 \times 10^{-3}$	$n = 1,7234$	
RW90	$k = 9,5375 \times 10^{-3}$	$n = 1,7539$	
RW70	$\alpha = 1,4638$	$\beta = 1,7617 \times 10^2$	<u>Weibull</u> $MR = e^{[-(\frac{t}{\beta})^\alpha]}$
RW80	$\alpha = 1,6846$	$\beta = 1,5674 \times 10^2$	
RW90	$\alpha = 1,6928$	$\beta = 1,0650 \times 10^2$	

*Constante k expresada en min^{-1} .

A partir de la Tabla 11 se observa que el valor de la constante k en la mayoría de los casos aumentó su valor conforme fue aumentando el valor de la temperatura. Estos resultados indican la dependencia directamente proporcional de la constante cinética k con la temperatura ($k \propto T$) y también una propiedad de pseudo-difusividad por parte de esta constante. Un valor más alto de la constante cinética k se transforma en un

secado más rápido y, en consecuencia, un valor mayor de la constante k es mejor desde el punto de vista energético, ya que el secado por RW es más eficiente (capacidad de lograr los resultados deseados con el mínimo posible de recursos). Estos resultados son comparables a los de otros autores que también informaron aumentos de la constante de secado k con el aumento de la temperatura, por ejemplo Uribe et al. (2022) informó valores de constante k para secado RW de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) para modelo H-P ($k = 1,10 \times 10^{-2} \rightarrow 3,63 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$), Page ($k = 1,70 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1} \rightarrow 9,20 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) y Page modificado ($k = 7,6 \times 10^{-3} \rightarrow 2,67 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$); Puente-Díaz et al. (2020) para secado RW de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) para modelo H-P ($k = 2,0 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1} \rightarrow 5,5 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$); Lemus et al. (2008) para secado de alga roja (*Gracilaria*) para modelo Page modificado ($k = 3,50 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1} \rightarrow 1,37 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$); Vega et al., (2007) para secado de pimiento rojo (*Lamuyo*) para modelo Newton ($k = 6,98 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1} \rightarrow 1,52 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$), Page ($k = 7,26 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1} \rightarrow 1,74 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$) y modelo Page modificado ($k = 2,37 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1} \rightarrow 1,33 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$).

Por otro parte, los valores del parámetro a en el modelo de Henderson y Pabis se relacionan con el contenido de humedad inicial H_0 . Un valor más alto del parámetro a significa que la humedad inicial de las muestras de manzana Royal Gala es mayor, y entonces será necesario eliminar más humedad durante el proceso de secado para alcanzar el contenido de humedad final H_f deseado. Esto significa también que el proceso de secado puede tardar más y requerir más energía para eliminar el exceso. En relación a lo anterior, los valores del parámetro a variaron de 1,1245 a 1,1424. La mayor diferencia observada entre estos valores es pequeña, siendo esta de 0,019, esta diferencia pequeña nos indica que la diferencia entre las humedades iniciales de las muestras antes de iniciar el proceso de secado por RW también es pequeña, y contenían humedades iniciales similares. Estos resultados son comparables a los

reportados por Vega et al. (2007) para secado de pimiento rojo (*Lamuyo*) para modelo H-P ($a = 1.07939 \rightarrow 1.17931$) y también a los informados por Uribe et al. (2022) informó valores de la constante a para secado RW de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) para modelo H-P ($a = 1,2053 \rightarrow 1,8271$).

Por otro lado, los valores del parámetro n en los modelos de Page y Page modificado representan la forma de la curva de secado, a menudo este parámetro n se le denomina factor de forma y determina qué tan rápido disminuye la velocidad de secado $-\partial MR/\partial t$ a medida que disminuye el contenido de humedad del producto alimenticio. En relación a lo anterior, se observa que el parámetro n aumenta conforme aumenta la temperatura en los procesos de secado por RW. Estos resultados revelan que las velocidades de secado tienen tasas de decrecimientos de velocidad de secado $\partial MR/\partial t$ más altas o más pronunciadas, en aquellos procesos de secado con mayor temperatura, por ejemplo, RW90, específicamente en los instantes de tiempos t , que tienden aproximarse al contenido de humedad crítica, $t \rightarrow H_c$. Por lo tanto, también podemos establecer una relación directa entre las variables temperatura, pendiente $\partial MR/\partial t$ y parámetro n . Además, se observa que todos los valores del parámetro n obtenidos son mayores a 1, lo que indica una velocidad de secado decreciente durante las últimas etapas del secado. Los resultados de este parámetro son comparables a los informados por otros autores, por ejemplo, Lemus et al. (2008) para secado de alga roja (*Gracilaria*) para modelo de Page modificado ($n = 0,96 \rightarrow 1,05$); Vega et al. (2007) para secado de pimiento rojo (*Lamuyo*) para modelo Page ($n = 1,29310 \rightarrow 1,40500$) y Page modificado ($n = 1,07017 \rightarrow 1,43650$); Uribe et al. (2022) informó valores de n para secado RW de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) para modelo Page y Page modificado ($n = 1,2971 \rightarrow 1,4187$); Senadeera et al. (2003) informó valores de constante n para modelo de Page de Judías verdes (*Phaseolus*

vulgaris) ($n = 1,06 \rightarrow 1,47$), papa (*Solanum tuberosum*) ($n = 1,46 \rightarrow 2,05$) y para arvejas (*Pisum sativum*) ($n = 1,09 \rightarrow 1,17$) y Puente-Díaz et al. (2020) para secado RW de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) para modelo de Page ($n = 2,0 \rightarrow 2,6$).

En cuanto a los parámetros α y β del modelo de Weibull, el parámetro α , se asimila a un índice de comportamiento del producto durante la rehidratación. El parámetro β está relacionado con la cinética del proceso, presentando una relación inversa con la velocidad del mismo. Los resultados obtenidos para el parámetro de forma α del modelo de Weibull fueron en aumento conforme las temperaturas también lo hacían. En consecuencia, la velocidad de absorción de agua de las muestras de pomasa de manzana es más baja, ya que las alzas en los valores de α suponen una baja en la velocidad de absorción de agua, por parte de las muestras, mientras se deshidratan, es decir existe una relación inversa entre el la temperatura y el factor de forma: $T \propto 1/\alpha$. Respecto al parámetro β estos decrecieron sucesivamente cuando las temperaturas aumentaron sucesivamente, en este sentido, temperaturas más altas implican cinéticas de secado cuyas velocidades del proceso de secado $\partial MR/\partial t$ son más altas. Estos resultados son comparables a los de otros investigadores, tales como Uribe et al. (2022) para secado RW de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) para modelo de Weibull ($\alpha = 1,29 \rightarrow 1,41$; $\beta = 37,64 \rightarrow 132,66$) y Tello-Ireland et al. (2011) para secado de alga (*Gracilaria chilensis*) ($\alpha = 1,06 \rightarrow 1,14$; $\beta = 44,18 \rightarrow 115,96$).

5.3.6. Análisis gráfico de los modelos matemáticos ajustados

Las siguientes Figuras 16, 17 y 18 muestran que las simulaciones de los modelos matemáticos de Page, Page mod. y Weibull, se superponen varias veces con las curvas experimentales RW 70/80/90 durante todo el proceso de secado, lo cual es un buen indicio de ajuste. En contraste, los modelos Newton y H-P se alejan y se aproximan intermitentemente en el proceso

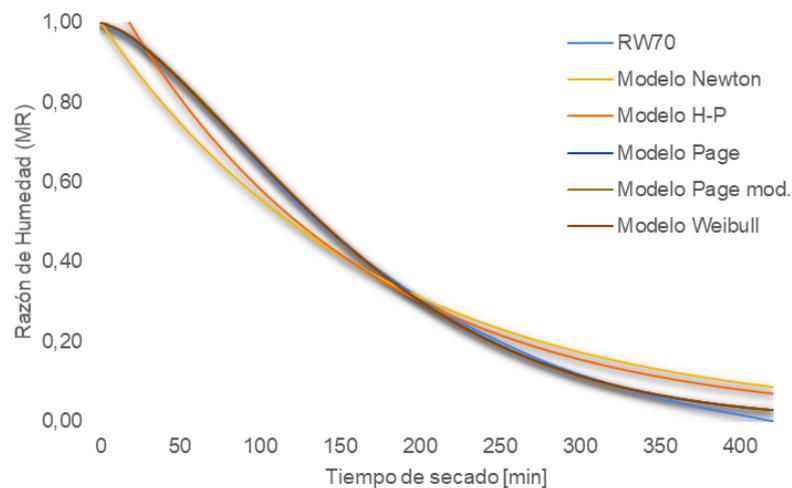


Figura 16. Curvas de simulación para RW70

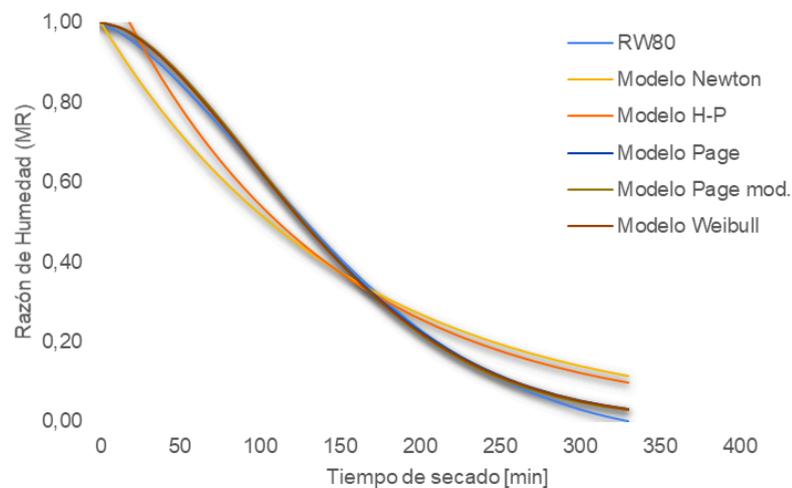


Figura 17. Curvas de simulación para RW80

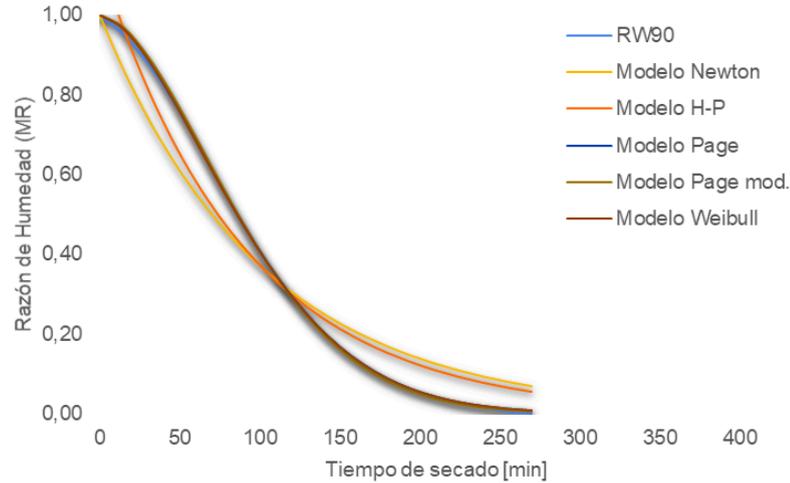


Figura 18. Curvas de simulación para RW90

La diferencia al cuadrado observada entre los datos experimentales y los predichos $(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$ revela que los valores de errores más altos provenientes de los modelos de Page, Page mod. y Weibull, son alrededor de un orden de magnitud de 10^{-4} mientras que el de los modelos Newton y H-P son alrededor de un orden de magnitud de 10^{-2} , esto significa que estos últimos son 100 veces más altos, en comparación a los observados por los modelos Page, Page mod. y Weibull. Una mirada conjunta a las Figuras 16 → 18, al procesamiento de datos y a las funciones exponenciales de las Ecuaciones 7 → 11 muestra que los valores de errores más altos entre los valores experimentales y los predichos ocurren cuando se aproximan a los tiempos de término de cada proceso 420 min (RW70), 330 min (RW80) y 270 min (RW90), específicamente cuando la razón de humedad $MR(t)$ en función del tiempo $f(t)$ es cero o tiende a cero: $MR(t) \rightarrow 0$. Esto se debe a que la función exponencial $MR(t) = e^{f(t)}$, donde $f(t)$ es cualquier función, nunca es nula, sea cual sea la función $f(t)$ a la que está elevada: $e^{f(t)} \neq 0, \forall t \in \mathbb{R}$, con restricción: $t \geq 0$ (en el mundo real no existen magnitudes negativas para la variable tiempo).

5.3.6. Análisis estadístico de los modelos matemáticos ajustados

A continuación, la siguiente Tabla 12 muestra los valores de R^2 , χ^2 y RMSE.

Tabla 12. Valores estadísticos y de error óptimos R^2 , χ^2 y RMSE

Modelo matemático	Secado RW			Estadístico evaluado
	RW70	RW80	RW90	
Newton	93,9974	88,6029	90,4259	$R^2(\%)$
H-P	92,2924	94,5762	95,2533	
Page	99,9057	99,8123	99,9763	
Page mod.	99,9047	99,8121	99,9531	
Weibull	99,9076	99,8218	99,9773	
Newton	$4,3486 \times 10^{-3}$	$8,0971 \times 10^{-3}$	$7,6210 \times 10^{-3}$	χ^2
H-P	$2,6335 \times 10^{-3}$	$5,5844 \times 10^{-3}$	$5,3848 \times 10^{-3}$	
Page	$1,0268 \times 10^{-4}$	$2,2757 \times 10^{-4}$	$3,1572 \times 10^{-5}$	
Page mod,	$1,0496 \times 10^{-4}$	$2,3297 \times 10^{-4}$	$6,3812 \times 10^{-5}$	
Weibull	$1,0077 \times 10^{-4}$	$2,1691 \times 10^{-4}$	$3,0129 \times 10^{-5}$	
Newton	$6,4797 \times 10^{-2}$	$8,8006 \times 10^{-2}$	$8,4970 \times 10^{-2}$	RMSE
H-P	$4,9516 \times 10^{-2}$	$7,1406 \times 10^{-2}$	$6,9412 \times 10^{-2}$	
Page	$9,7774 \times 10^{-3}$	$1,4415 \times 10^{-2}$	$5,3149 \times 10^{-3}$	
Page mod.	$9,8855 \times 10^{-3}$	$1,4585 \times 10^{-2}$	$7,5561 \times 10^{-3}$	
Weibull	$9,6859 \times 10^{-3}$	$1,4073 \times 10^{-2}$	$5,1921 \times 10^{-3}$	

Letra en negrita indica valores estadísticos y de error óptimos

A partir de la Tabla 12 se observa que el mayor valor del coeficiente de determinación R^2 se obtiene mediante las cinéticas del modelo de Weibull, y por lo tanto este modelo tiene la mejor bondad de ajuste para describir el proceso de secado en capa fina de pomasa de manzana. Sin embargo, también los modelos de Page y Page modificado podrían describir satisfactoriamente el proceso, ya que tienen R^2 superiores a 99%. En relación a los valores de chi-cuadrado χ^2 , se observa que el

modelo matemático de Weibull presentó los valores más bajos. Si existe concordancia perfecta entre los valores experimentales y los predichos, el estadístico tomará un valor igual a 0. Por esta razón el modelo de Weibull es el más adecuado también acuerdo a este parámetro, ya que tiene los valores χ^2 más cercanos a 0. En relación a los valores de la raíz del error cuadrado medio RMSE se observa que el modelo de Weibull presentó el menor valor RMSE. Si tiene un valor menor, significa que los valores pronosticados están cerca de los valores observados y viceversa. RMSE permite cuantificar cuán diferente es un conjunto de valores, cuanto más pequeño es un valor RMSE, más cercanos son los valores predichos y experimentales. De manera que, el modelo de Weibull, tiene la mayor bondad de ajuste de acuerdo al parámetro RMSE también. Estos resultados son comparables a los informados por otros autores, por ejemplo Corzo et al. (2008) investigó la aplicación del modelo de distribución de Weibull para describir el contenido de humedad de coronas de palma (*Attalea maripa*) ($R^2 = 90,6\% \rightarrow 99,9\%$; $\chi^2 = 1,29 \times 10^{-4} \rightarrow 3,74 \times 10^{-4}$); García-Pascual et al. (2006) examinó la rehidratación de hongos (*Morchella esculenta*) mediante modelamiento con cinética de Weibull ($R^2 > 99,4\%$); Lakshmi et al. (2018) reportó parámetros estadísticos para el secado de cúrcuma negra (*Curcuma caesia*) mediante cinética de Page ($R^2 = 99,48\%$; $\chi^2 = 4,0 \times 10^{-4}$; $RMSE = 1,98 \times 10^{-2}$) Newton/ Lewis ($R^2 = 95,01\%$; $\chi^2 = 3,8 \times 10^{-3}$; $RMSE = 6,17 \times 10^{-2}$) y de H-P ($R^2 = 96,54\%$; $\chi^2 = 2,7 \times 10^{-3}$; $RMSE = 5,14 \times 10^{-2}$) y Vijayan et al. (2016) informó para secado en capa fina de calabaza amarga mediante cinética de Newton/ Lewis ($R^2 = 99,52\%$; $\chi^2 = 4,83 \times 10^{-4}$; $RMSE = 2,05 \times 10^{-2}$) Page ($R^2 = 99,85\%$; $\chi^2 = 1,68 \times 10^{-4}$; $RMSE = 1,12 \times 10^{-2}$) y modelo H-P ($R^2 = 99,85\%$; $\chi^2 = 1,68 \times 10^{-4}$; $RMSE = 1,12 \times 10^{-2}$)

5.4 Tamizado de polvo de manzana seco

A continuación, la Figura 19 muestra el balance de masa para pomasa de manzana

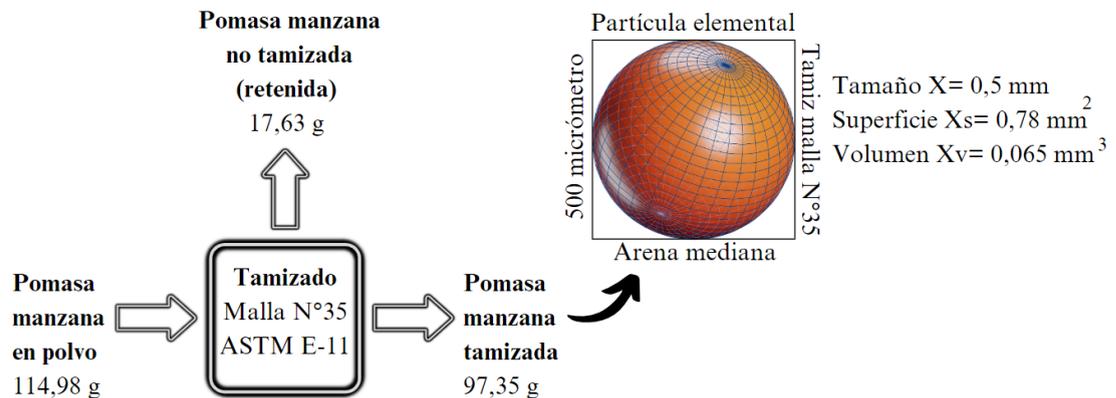


Figura 19. Balance de masa de pomasa de manzana deshidratada y tamizada

En la Figura 19, se observa que a partir de 114,98 g (100%) de polvo de pomasa deshidratado es posible obtener 97,35 g (84,6%) de polvo de pomasa deshidratado y tamizado, mientras que 17,63 g (15,4%) de polvo de pomasa de manzana quedan retenidos en el tamiz malla N°35.

La Norma *Representación de resultados del análisis del tamaño de partículas*, define el tamaño de partícula como el diámetro de una esfera que tiene las mismas propiedades físicas; esto se conoce como diámetro esférico equivalente. El diámetro equivalente se indica mediante un subíndice, por ejemplo, el diámetro de superficie equivalente (X_s) y diámetro de volumen equivalente (X_v). El tamaño final de partícula X y las propiedades físicas equivalentes X_s y X_v obtenidas para el producto de manzana deshidratada son $X = 0,5$ mm; $0,78$ mm² y $0,065$ mm³, respectivamente. Por otro parte, la norma ASTM D2487 establece que la clasificación de arena varía entre 4,75 a 0,075 mm, además establece que la arena mediana tiene un tamaño de partícula comprendido entre 2 y 0,425 mm. Por consiguiente, el tamaño de partícula del producto de manzana deshidratada se clasifica como arena mediana.

5.5. Resultados de color en muestras de pomasa de manzana Royal Gala

5.5.1. Parámetros de color superficial L*, a*, b*, ΔE

A continuación, en la Tabla 13 se muestran los parámetros de color L*, a*, b*, ΔE

Tabla 13. Resultados de los parámetros de color L*, a*, b*, ΔE

Parámetro	Tratamiento de secado			
	Control	RW70	RW80	RW90
L*	64,33 ± 13,43 ^a	48,22 ± 5,80 ^b	62,22 ± 8,44 ^a	60,00 ± 8,29 ^a
a*	31,33 ± 11,85 ^a	40,22 ± 5,75 ^b	36,67 ± 10,71 ^a	36,89 ± 7,67 ^a
b*	47,67 ± 6,81 ^a	43,22 ± 8,95 ^a	45,22 ± 0,19 ^a	49,44 ± 5,35 ^a
ΔE	-	21,07 ± 4,23 ^a	9,78 ± 10,04 ^b	11,30 ± 6,62 ^b

Medias con una letra común en una misma fila no son significativamente diferentes

A partir de la Tabla 13, se observa que las muestras Control presentaron medias más altas del parámetro L* por lo tanto, las muestras húmedas son más luminosas o menos oscuras, en comparación a las muestras secas que recibieron los tratamientos RW, aunque estas diferencias no son estadísticamente significativas en el caso de RW80 y RW90. Las muestras Control también presentaron medias del parámetro a* más bajas, esto significa que las muestras secas presentaron mayor componente rojo que las muestras húmedas, pero solo se observaron significativamente más altas en componente rojo en el caso de RW70. En las muestras secas que recibieron tratamiento RW80 se observa que significativamente oscurecieron menos, y también se tornaron más bajas en componente rojo, en comparación con las muestras secas que recibieron tratamientos RW70. En relación a las diferencias de color total ΔE, se observa que todos los valores son superiores a 2,0 ($\Delta E > 2,0$), esto significa que los cambios de color adoptados por las muestras después de recibir los tratamientos RW pueden ser fácilmente detectados por el ojo humano. En estricto rigor, se dice que

cuando este valor ΔE está por debajo de 2,0 los observadores capacitados notarán la diferencia, mientras que cuando este valor ΔE es superior a 3,5 una clara diferencia en el color es notada incluso por observadores promedio (Mokrzycki & Tatol, 2011). Las muestras que recibieron tratamiento RW80 presentaron las medias de ΔE más bajas, esto significa que las muestras secas que recibieron este tratamiento sufrieron el menor cambio o alteración de todos los colores en general en comparación a las muestras secas que recibieron tratamientos RW, sin embargo, estas diferencias sólo son estadísticamente significativas en comparación al tratamiento RW70. En relación a los cambios del color total de las muestras secas que recibieron tratamiento RW70 y RW90 se observa que sus valores de ΔE se encuentran dentro del rango $\Delta E = 11 \rightarrow 49$, este rango, indica que los colores superficiales de las muestras después de recibir el tratamiento son más parecidos que opuestos en relación a las muestras Control, es decir, las muestras secas después de recibir los tratamientos con RW70 y RW90 continúan siendo colorimétricamente parecidas al Control. Las medias con mayor diferencia de color se observaron en las muestras secas que recibieron tratamiento RW70, mientras que con menor diferencia en las que recibieron tratamiento RW80, siendo estas diferencias estadísticamente diferentes. Los resultados presentados anteriormente son comparables a los resultados presentados por diferentes autores que anteriormente han realizado procesos de secado para manzana por diferentes métodos, por ejemplo, Demiray et al. (2023) informó para manzana Granny Smith secadas a temperatura 65°C ($L^* = 68,72$; $a^* = 10,21$; $b^* = 39,99$; $\Delta E = 22,90$); Vega et al. (2012) también informo para secado de manzana Granny Smith secadas a 60°C ($\Delta E = 33,88$) y 80°C ($\Delta E = 27,04$); Kriaa y Nassar (2020) informó para secado de manzanas Gala por horno microondas ($\Delta E = 11,23 - 13,31$); Cruz et al. (2014) informo para secado por convección de manzanas Golden Delicious a 60°C ($\Delta E =$

25,04) y también a temperatura de 60°C para manzana Granny Smith ($\Delta E = 22,69$); Huang et al. (2022) informó para secado de manzanas Fuji a 70°C ($L^* = 83,61$; $a^* = 1,74$; $b^* = 28,38$; $\Delta E = 13,39$); Kidoń y Grabowska (2021) informó para secado de manzana de pulpa roja (*Malus purpurea cv. Aldenham Purple*) por tres métodos de secado, convección a 60°C ($\Delta E = 16,7$) microondas con secado por convección ($\Delta E = 18,5$) y liofilización ($\Delta E = 18,5$) y Picouet et al. (2009) informo para pomasa de manzana Granny Smith secada por microondas ($L^* = 63,0$; $a^* = - 5,8$; $b^* = 26,4$)

5.5.2. Índice de pardeamiento e índice de blancura

A continuación, la Tabla 14 muestra los índices de pardeamiento y de blancura.

Tabla 14. Índices de pardeamiento y de blancura

Tratamiento de secado	Índice de pardeamiento BI	Índice de blancura WI
RW70	2,24 ± 0,54 ^a	21,09 ± 7,56 ^a
RW80	1,62 ± 0,45 ^b	30,24 ± 10,51 ^b
RW90	1,91 ± 0,45 ^b	26,02 ± 7,35 ^b

Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes.

En la Tabla 14 se observa que las muestras que recibieron tratamiento RW70 presentaron el mayor índice de pardeamiento y el menor índice de blancura, con diferencias estadísticas, respecto a RW80 y RW90. Por el contrario, las muestras que recibieron tratamiento RW80 presentaron el menor índice de pardeamiento y el mayor de blancura, sin diferencias estadísticas en comparación con aquellas que recibieron tratamiento RW90. Los resultados de índice de pardeamiento y blancura presentados anteriormente, son comparables a los informados por otros autores por ejemplo Kahraman et al. (2021) informó índices de pardeamiento para secado de rodajas de manzanas Gala ($BI = 48,71-91,54$); Đjekić et al. (2018) también informó índice de pardeamiento para secado de manzana (*Malus pumila 'Elstar'*) ($BI = 33,44 -$

77,94), mientras que Ghinea et al. (2022) informó índice de pardeamiento e índice de blancura manzanas (*Starkrimson*) secas (BI = 61.34; WI = 47.29), Golden Delicious secas (BI = 51,72; WI = 57,07) y manzana (*Florina*) secas (BI = 60,30; WI = 51,77).

5.6. Compuestos bioactivos de pomasa de manzana

A continuación, la Tabla 15 muestra el contenido de los compuestos bioactivos.

Tabla 15. Contenido de los compuestos bioactivos.

Tratamiento de secado	Contenido de polifenoles totales	Capacidad antioxidante total
Control	461,78 ± 1,53 ^a	10543 ± 459 ^a
RW70	211,40 ± 0,41 ^b	2432 ± 198 ^b
RW80	287,51 ± 0,29 ^c	3207 ± 704 ^c
RW90	259,32 ± 0,68 ^{bc}	3444 ± 120 ^c

Polifenoles expresados en mg EAG/100 g b.s ; C. antioxidante en u.mol ET/100 g b.s
Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes.

Las muestras secas de pomasa de manzana después de recibir los secados RW70/80/90, cuyas humedades promedias obtenidas son 12,77%, 9.83% y 6.75%, vieron afectada significativamente su concentración de polifenoles y capacidad antioxidante respecto al Control. En relación a este último, los polifenoles observados para el Control son comparables a los reportados por Kidoń y Grabowska (2021) (421 mg EAG/ 100 g.b.s) para manzana de pulpa roja. Además, las muestras secadas por RW80 obtuvieron una concentración de polifenoles significativamente superior en comparación a las muestras que fueron secadas con tratamiento RW70, pero no en comparación a las muestras secas con RW90. Los polifenoles de manzana extraídos de la pomasa podrían utilizarse en varios productos alimenticios como aditivo

alimentario funcional, conservante, etc, por lo tanto, se presentan como una buena alternativa para la elaboración de bebidas (Jian et al., 2014)

Respecto a la capacidad antioxidante, las muestras que recibieron tratamientos RW vieron afectada significativamente su capacidad antioxidante respecto al Control. Además, se observa que las muestras que recibieron tratamiento RW70 obtuvieron una media de capacidad antioxidante significativamente inferior en comparación con aquellas secadas con tratamiento RW80 y RW90. En relación a lo anterior, Lee and Smith (2000) informó medias de los fenólicos presentes en diferentes cultivares de manzana, entre ellas manzana Gala, como glucósidos de floretina y quercetina, procianidina B2, ácido clorogénico, y epicatequina. Siendo la quercetina el antioxidante más poderoso, reduce la actividad cancerígena de varios mutágenos alimentarios y también mejora la actividad antiproliferativa de los agentes anticancerígenos. Las personas con un consumo bajo de frutas con potencial antioxidante protector alto, como las manzanas, experimentan aproximadamente el doble de riesgo de cáncer en comparación con aquellos con un consumo alto de estas. Esto ayuda a explicar por qué "una manzana al día mantiene al médico lejos." (Block et al., 1992; Lee and Smith, 2000).

La variabilidad puede explicarse a factores agronómicos, tales como las condiciones de crecimiento, la madurez al momento de la cosecha y las prácticas agrícolas, pudiendo afectar la composición química de las manzanas, además de las condiciones de secado, como la temperatura, el tiempo y la humedad, también pueden influir en la retención de bioactivos, susceptibles a la oxidación, a la exposición al oxígeno, y de almacenamiento, por ejemplo, la exposición a la luz (Sardella et al., 2023).

En síntesis, el secado en capa fina de pomasa de manzana obtiene sus mejores respuestas con el tratamiento RW80, y existe un efecto significativamente negativo

debido a la exposición de oxígeno cuando los tiempos de secado son muy extensos (420 min) o se usan temperaturas altas (90°C). Por este motivo, se seleccionará la pomasa con el tratamiento RW80 para la formulación de la bebida.

5.7. Caracterización de las formulaciones de bebidas lácteas

5.7.1. Apariencia

A continuación, la Figura 20 muestra la apariencia de las formulaciones de la Tabla 7



Figura 20. Bebidas F1-F9 posterior almacenamiento 24 horas/ 4°C

La apariencia de una bebida formulada a partir de una mezcla de suero de leche con jugo y pomasa de manzana puede ser única y atractiva. La bebida podría tener un color que combine tonos lácteos con matices de amarillo o dorado, dependiendo de la concentración de jugo de manzana. La pomasa de manzana podría añadir notas más oscuras o pequeñas partículas que contribuyan a una apariencia natural. Se podrían observar pequeñas partículas de pomasa de manzana en la bebida, contribuyendo a una apariencia artesanal y natural. El uso de un envase también contribuirá a la percepción visual, un envase transparente podría resaltar la frescura y los colores

naturales, mientras que un diseño atractivo podría enfatizar la calidad y la innovación del producto.

5.7.2. Color mediante análisis de imágenes

Los parámetros de color L*, a*, b*, C*, H° de bebidas se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultado de parámetros L*, a*, b*, C*, H° de formulaciones

Formulación	L*	a*	b*	C*	H°
F1	53,67 ± 1,15 ^a	20,33 ± 0,58 ^a	32,00 ± 2,65 ^{abcd}	37,93 ± 2,35 ^a	57,49 ± 2,06 ^a
F2	58,33 ± 2,08 ^b	15,67 ± 2,31 ^{bc}	29,00 ± 1,00 ^{de}	32,99 ± 1,89 ^b	61,73 ± 2,95 ^{ab}
F3	57,33 ± 1,53 ^b	18,67 ± 0,58 ^{ab}	31,00 ± 3,00 ^{bcd}	36,20 ± 2,83 ^{ab}	58,85 ± 1,80 ^a
F4	63,67 ± 1,53 ^c	15,33 ± 0,58 ^{cd}	35,00 ± 3,46 ^a	38,22 ± 3,28 ^a	66,24 ± 1,90 ^{bc}
F5	66,00 ± 1,00 ^d	12,33 ± 0,58 ^{de}	30,33 ± 0,58 ^{cd}	32,75 ± 0,47 ^b	67,87 ± 1,17 ^c
F6	69,00 ± 1,00 ^e	11,33 ± 3,21 ^e	26,00 ± 1,73 ^e	28,50 ± 1,37 ^c	66,47 ± 6,74 ^{bc}
F7	72,67 ± 1,53 ^f	6,33 ± 2,89 ^f	33,00 ± 2,65 ^{abc}	33,68 ± 2,77 ^b	79,22 ± 4,80 ^d
F8	70,33 ± 1,15 ^e	11,00 ± 2,65 ^e	34,33 ± 2,52 ^{ab}	36,14 ± 1,85 ^{ab}	72,11 ± 4,93 ^c
F9	70,33 ± 0,58 ^e	10,67 ± 0,58 ^e	30,67 ± 1,53 ^{bcd}	32,47 ± 1,62 ^b	70,82 ± 0,31 ^c

Medias con una letra común en una misma columna no son significativamente diferentes

A partir de la Tabla 16 se observa que las formulaciones con 20% de mezcla y 1,5-2,5% de pomasa, por ejemplo, F7-F9 obtuvieron un aspecto más luminoso, que aquellas formulaciones F1-F6 con contenidos de 30% o 40% de mezcla y entre 1,5-2,5% de pomasa. Anteriormente Zhu et al. (2019) ya había informado que los valores de L* decrecen con el aumento de contenidos de bebidas de manzana, mientras que los valores de a* y b* se incrementan. La formulación F7 presentó el mayor valor del parámetro L* siendo la más luminosa y F1 el menor valor siendo la más oscura, ambas formulaciones son significativamente más luminosas y oscuras en comparación a las demás formulaciones. Estos últimos resultados son comparables a

los parámetros de color L^* reportados para bebidas de naranja informados por Wibowo et al. (2015) ($L^* = 61$), Dhenge et al. (2022) ($L^* = 65-70$) y Meléndez-Martínez et al. (2011) ($L^* = 73-76$).

Las formulaciones F1 y F3, con contenidos de 40% mezcla y entre 1,5-2,5% de pomasa fueron significativamente más altas en componente rojo (a^*) que las formulaciones F4-F9, con contenidos de 20-30% mezcla de bebida y entre 1,5-2,5% de pomasa. La formulación F1 con contenido de pomasa de 1,5% fue significativamente más alta en componente rojo que F2. A su vez, las formulaciones F7-F9 fueron significativamente más bajas en componente rojo que las formulaciones F1-F4. La formulación F1 es significativamente más alta en componente rojo en comparación a las demás formulaciones, mientras que F7 es significativamente más baja en componente rojo. Estos resultados son comparables al parámetro de color a^* informado por Segura et al. (2017) ($a^* = 25,31$) para bebida de manzana. La formulación F6 fue significativamente más baja en componente amarillo que las demás formulaciones, mientras que la formulación F4 fue la más alta en componente amarillo. Este último resultado es comparable a los parámetros de color b^* reportado por Liberatore et al. (2021) para jugos de manzana Red Delicious ($b^* = 26,8 - 34,9$) y Golden Delicious ($b^* = 33,7 - 43,0$).

Respecto a la cromaticidad $*C$, la formulación F6 presentó una saturación de color significativamente inferior, en comparación a las demás, esto significa un color más pálido. Por el contrario, la formulación F4 obtuvo la mayor saturación de color, esto puede ser entendido como aquella formulación con los colores “más vivos”.

Respecto a la tonalidad (H°), todas las formulaciones tienen una tonalidad más inclinada al componente amarillo estricto ($H^\circ = 90$) que al componente rojo estricto ($H^\circ = 0$), ya que los valores de H° son mayor a 45° ($H^\circ > 45$), sin embargo, las

formulaciones F7-F9 tuvieron una tonalidad más inclinada hacia este componente amarillo estricto, en comparación a la demás, siendo F7 la formulación con la tonalidad más alta, y significativamente superior. Por el contrario, las formulaciones F1-F3 tuvieron una tonalidad más alejada del componente amarillo estricto o más cercana al componente rojo estricto, en comparación a las demás formulaciones, Entre estas últimas, la formulación F1 mostró valores de tonalidad más cerca del componente rojo estricto y más lejos del componente amarillo estricto en comparación a las demás formulaciones.

Los cambios en los parámetros L^* , a^* , b^* , C^* y H° observados anteriormente podrían deberse a que el color natural de las formulaciones es el resultado de la acción enzimática de la Polifenol Oxidasa sobre los compuestos fenólicos (provenientes del jugo de manzana). Esta enzima en conjunta con otras, por ejemplo, la Pectinmetilesterasa, pueden degradar la calidad de las mezclas formuladas, incluidos el color. Por otro parte, estos cambios de color observados también podrían deberse a otras causas, por ejemplo, reacciones de Maillard asociados a la bebida de suero dulce concentrada en proteínas, a la oxidación de lípidos, formación de compuestos volátiles y reducción de lisina, específicamente cristalización de la lactosa por la humedad, que se traduce en un aumento de las reacciones de pardeamiento con la lisina (Aguilar-Rosas et al., 2013; Tunick et al., 2016)

5.7.3. pH

A continuación, la Figura 21 muestra el pH observado en las formulaciones

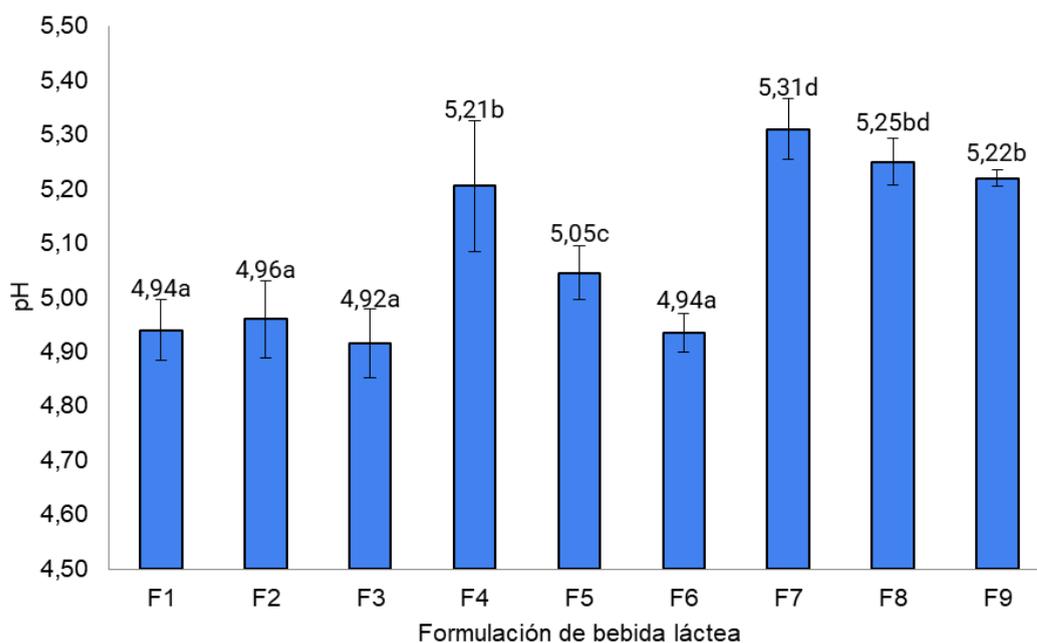


Figura 21. pH de bebidas proteicas saludables
Barras de error = Desviación estándar

A partir de la Figura 21 se observa que la tendencia es el aumento general de pH en formulaciones con menor porcentaje de Mezcla de bebida, por ejemplo, Mezcla de bebida = 20% (F7, F8 y F9). El rango de pH de las formulaciones osciló entre 4,92 y 5,31 este rango de pH no cubre el punto isoeléctrico $pI = 4,50$ donde se ha observado descensos de la solubilidad de las proteínas del lactosuero de acuerdo a lo informado por Pelegrine and Gasparetto (2005), por lo tanto, las proteínas provenientes del suero de leche concentrado debiesen permanecer en solución. Además, las comparaciones estadísticas muestran que las formulaciones F7, F8 y F9 tuvieron un pH significativamente superior al de las formulaciones F1, F2, F3, F5 y F6. Entre ellas F3 presentó el pH más bajo siendo este de 4,92. Por el contrario, F7 presentó el pH más alto siendo este de 5,31. Además, F5 presentó un pH intermedio estadísticamente diferente al de todas las formulaciones siendo este de 5,05. Respecto

al aspecto microbiológico Mavropoulou and Kosikowski (1973) informaron que aquellas formulaciones lácteas provenientes de sueros ácidos con pH comprendidos entre 4,6 y 5,0 generalmente eran más estables en almacenamiento a temperatura ambiente y tenían pocos microorganismos en comparación a formulaciones lácteas provenientes de sueros dulces con pH más altos comprendidos entre 6,2-6,4. En relación a lo anterior, podemos observar que las formulaciones con Mezcla de bebida = 40% (F1, F2 y F3) presentan en promedio un pH más bajo, siendo este 4,94, por lo tanto ellas serían mejores candidatas desde el punto de vista microbiológico en comparación a formulaciones con Mezcla = 30% (F4, F5 y F6) o 20% (F7, F8 y F9) cuyos promedios observados de pH fueron 5,06 y 5,26 respectivamente. Es importante mencionar que los rendimientos energéticos de los microorganismos están estrechamente relacionados con su crecimiento y responden fuertemente a la variación del pH. Lawlor et al. (2009) informó que el pH y la acidez son factores cruciales que pueden perjudicar la calidad microbiológica en bebidas lácteas. Por regla general el crecimiento del microbio perjudicial aumentará con un aumento del pH. Naturalmente los patógenos que causan enfermedades transmitidas por los alimentos no crecerán a un pH de 4,6. Por otra parte, los compuestos químicos orgánicos disueltos en las formulaciones pueden reaccionar con moléculas de agua, adquiriendo o cediendo protones (H^+) e hidróxidos (OH^-), y pueden combinarse con otras moléculas e iones presentes en las formulaciones. Como resultado, aparecen diferentes formas o especies químicas, este fenómeno recibe el nombre de *especiación química*. Esto significa que es posible la regulación de la especiación química por el pH, la modulación de la actividad microbiana y sus interacciones, específicamente el metabolismo de los microbios. Un ejemplo de estos es *Streptomyces griseus*, un contaminante importante que suele aparecer en bebidas

formuladas con manzana, produce un sabor terroso y mohoso, además es gram positivo y productor de esporas, las cuales le confieren resistencia frente a tratamientos térmicos. Para terminar esta sección, cabe destacar que los aditivos actuales y los antimicrobianos comunes tienen, hasta cierto punto, una acción antimicrobiana limitada, y es muy probable que más pronto que tarde se reconozcan nuevos aditivos alimentarios, como es el caso de los antimicrobianos naturales, específicamente el compuesto químico orgánico cinamaldehído y sus derivados presentes en la canela, que muestra un amplio espectro de actividad antimicrobiana al inhibir patógenos transmitidos por los alimentos y microorganismos contaminantes (Lawlor et al., 2009; Jin & Kirk, 2018; Vijayalakshmi et al., 2021).

5.7.3.1. Ecuación de efectos estandarizados para pH

Los efectos para pH están dados por la Figura 22.

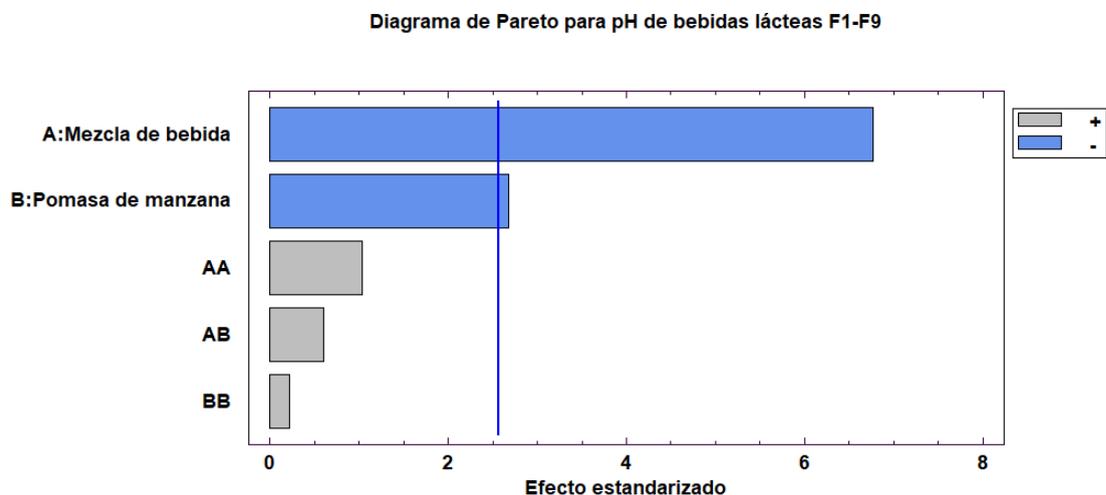


Figura 22. Diagrama de Pareto para pH

La Figura 22 muestra que solo los efectos de la forma lineal de la Mezcla de bebida (7) y la pomasa de manzana (2,5) son significativos, ya que se encuentran por delante de la línea de significancia. En consecuencia, la Ecuación de regresión puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\text{pH} = 6,46754 - 0,0457368 \times \text{Mezcla de bebida} - 0,357982 \times \text{Pomasa de manzana} + 0,000378947 \times \text{Pomasa de manzana}^2 + 0,0035 \times \text{Mezcla de bebida} \times \text{Pomasa de manzana} + 0,0315789 \times \text{Pomasa de manzana}^2$$

$$\text{pH} = 6,46754 - 0,0457368 \times \text{Mezcla de bebida} - 0,357982 \times \text{Pomasa de manzana}$$

(Ec. 26)

5.7.4. Sólidos solubles

A continuación, la Figura 23 muestra los s. solubles observado en las formulaciones

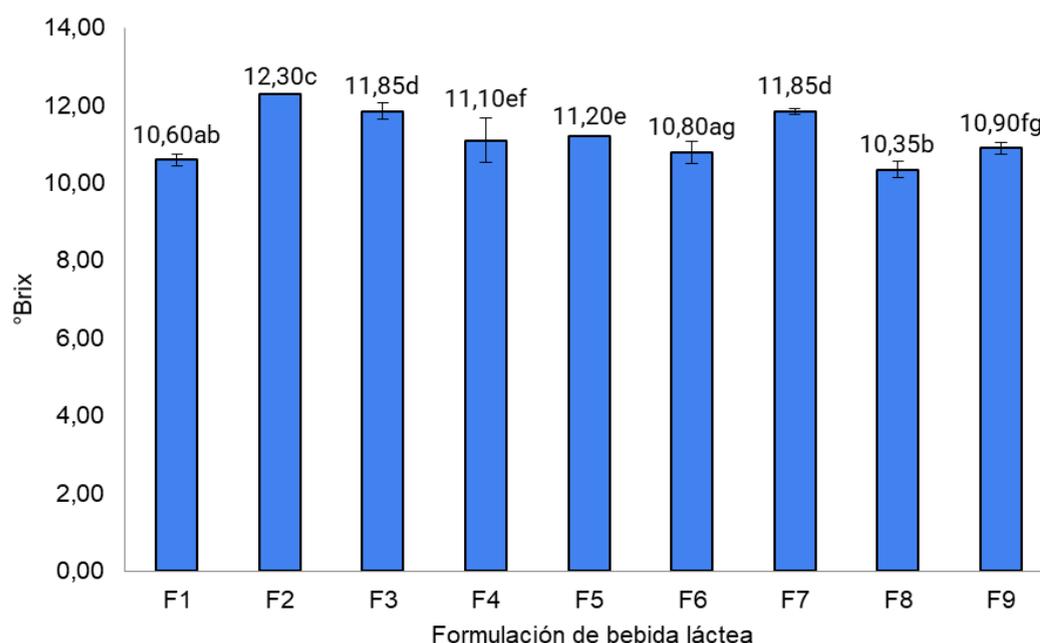


Figura 23. Sólidos solubles de bebidas proteicas saludables
Barras de error = Desviación estándar

Se observa que la tendencia general es el descenso de sólidos solubles a medida que se reducen los porcentajes de Mezcla. La formulación F2 presentó un contenido de sólidos solubles significativamente superior al resto (12,30 °Brix), por el contrario, F8 presentó uno significativamente inferior (10,35 °Brix). En cambio, F5 presentó

contenido de sólidos solubles significativamente superiores en comparación a F8 y también a F9, al igual que F7 cuyo contenido de sólidos solubles observados es 11,85 °Brix. Este último resultado coincide con F3. La formulación F7 presentó contenidos significativamente superiores en comparación a F4, F5 y F6. En relación a lo anterior, podemos observar que aquellas formulaciones con porcentajes de Mezcla de bebida = 40%, (F1, F2 y F3) muestran, en promedio, contenidos más altos (°Brix = 11,58) en comparación con aquellas con Mezcla de bebidas = 20% o 30% cuyos contenidos de sólidos solubles promedios observados son 11,03 °Brix para ambos grupos. Esto sugiere un efecto de aumento en el dulzor de las formulaciones, procedentes de la bebida de manzana que se utilizó para la elaboración de ellas, cuyo contenido de sólidos solubles es 13,63 °Brix. En relación a lo anterior, el contenido de sólidos solubles totales muestra una alta correlación positiva con el contenido de azúcares y, por lo tanto, es generalmente aceptado como un rasgo de calidad importante de la manzana y también de sus productos elaborados a partir de ellas, por ejemplo, bebidas de suero saborizadas con jugo de manzana natural. Decidir sobre cuál sistema de edulcorante a utilizar a menudo es un factor de costo y de requisitos de etiquetado. Por lo que endulzar naturalmente la Mezcla de bebida con jugo natural de manzana se presenta como una buena alternativa. Los edulcorantes naturales proporcionan, además del dulzor, otras ventajas, por ejemplo, proporcionan calorías para obtener energía, viscosidad para la sensación en boca e inhiben algunas formas de actividad microbiana (Beristain et al., 2006; Silva et al., 2006)

5.7.4.1. Ecuación de efectos estandarizados para sólidos solubles

Los efectos para sólidos solubles están dados por la siguiente Figura 24

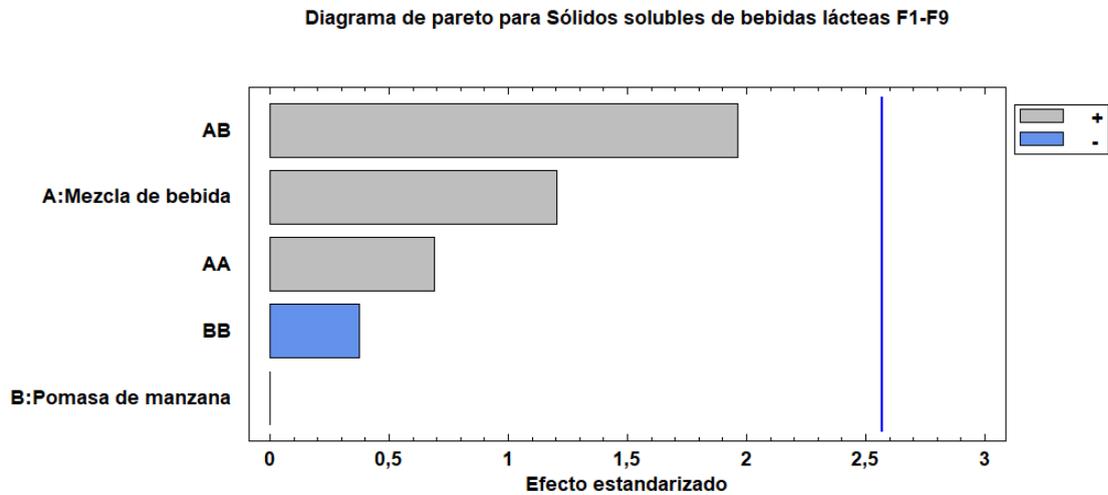


Figura 24. Diagrama de Pareto para sólidos solubles

La Figura 24 muestra que ni los efectos de la forma lineal, cuadrática o combinada son significativos, al menos a un nivel de significancia 5%, ya que se encuentran por detrás de la línea de significancia. Sin embargo, la interacción entre los factores presentó el mayor efecto no significativo (2). En consecuencia, la Ecuación 27 puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\text{Sólidos solubles} = 17,0132 - 0,338553 \times \text{Mezcla de bebida} - 1,19474 \times \text{Pomasa de manzana} + 0,00243421 \times \text{Mezcla de bebida}^2 + 0,11 \times \text{Mezcla de bebida} \times \text{Pomasa de manzana} - 0,526316 \times \text{Pomasa de manzana}^2$$

$$\text{Sólidos solubles} = 17,0132 - 0,11 \times \text{Mezcla de bebida} \times \text{Pomasa de manzana} \quad (\text{Ec. 27})$$

Con sólidos solubles expresado en °Brix.

5.7.5. Polifenoles

A continuación, la Figura 25 muestra los contenidos de polifenoles observados

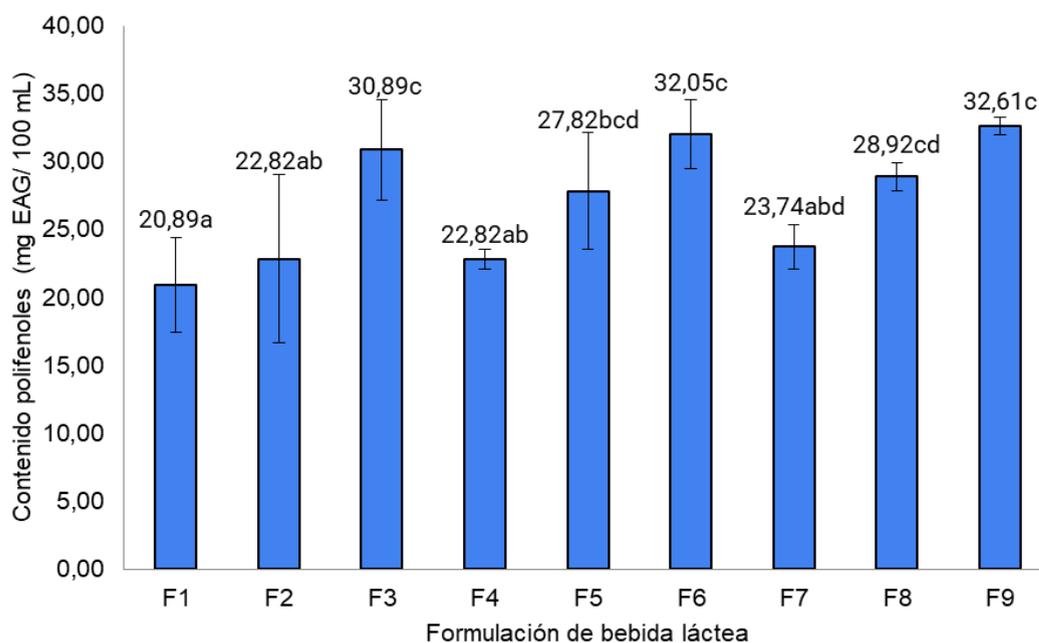


Figura 25. Contenido de polifenoles de bebidas proteicas saludables
Barras de error = Desviación estándar

A partir de la Figura 25 se observa que el contenido de polifenoles es mayor en formulaciones de bebidas lácteas con mayor porcentaje de Pomasa de manzana, por ejemplo formulaciones con Pomasa de manzana = 2,5% tales como F3, F6 y F9 siendo el promedio de ellas de 31,85 mg EAG/100 mL, en comparación con aquellas formulaciones que fueron elaboradas con porcentajes de Pomasa de manzana = 2,0%, por ejemplo F2, F4 y F8, promedio = 26,52 mg EAG/100 mL o en comparación con aquellas formulaciones con porcentaje de Pomasa de manzana = 1,5%, por ejemplo F1, F3 y F7, promedio = 22,48 mg EAG/100 mL. Entre las formulaciones, F9 presentó el mayor contenido de polifenoles, siendo este contenido significativamente superior al de F1, F2, F5 y F7. Por el contrario, F1 presentó el menor contenido de polifenoles. Este último resultado es significativamente inferior al resultado de F3, F5, F6, F8 y F9. Además, F5 presentó un contenido de polifenoles intermedio de

27,82 mg EAG/100 mL, siendo este valor superior al F1. En esta sección es importante destacar que, debido a los estilos de vida agitados y desordenados, durante la última década ha habido una demanda creciente de bebidas “saludables” en muchas partes del mundo. Por lo tanto, el desarrollo de bebidas funcionales con diversos compuestos fenólicos como ingredientes funcionales ha ido creciendo enormemente. Los compuestos fenólicos están asociados con una alta capacidad antioxidante y, por tanto, con beneficios para la salud humana. También se utilizan en bebidas para posicionar estrategias relacionadas, como el rendimiento deportivo, la fatiga y la resistencia (Das et al., 2019).

5.7.5.1. Ecuación de efectos estandarizados para polifenoles

Los efectos para polifenoles están dados por la siguiente Figura 26

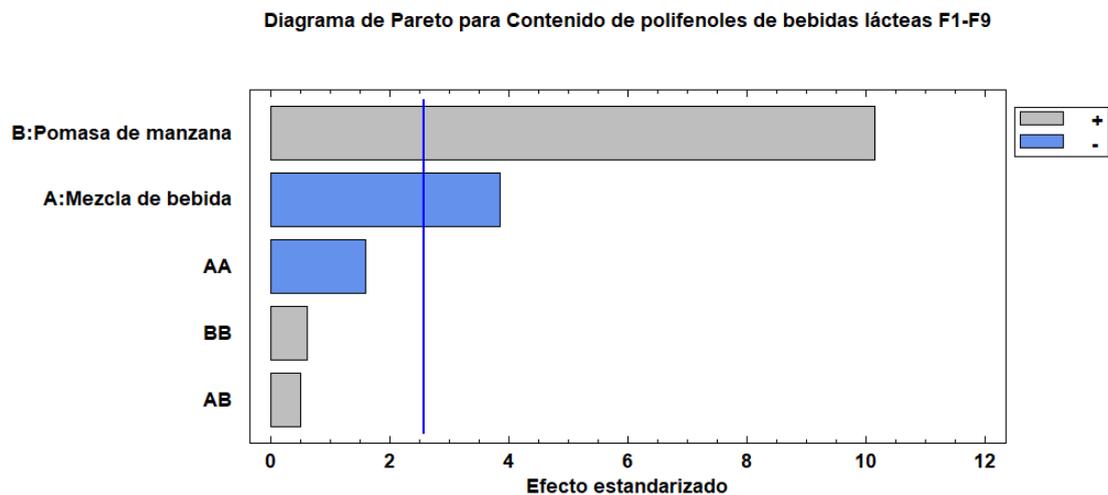


Figura 26. Diagrama de Pareto para contenido de polifenoles totales

La Figura 26 muestra que solo los efectos de la Pomasa de manzana (10) y de la Mezcla de bebida (4) son significativos, ya que se encuentran por delante de la línea de significancia, por lo tanto, la Ecuación 28 puede obtenerse de la siguiente manera:

Polifenoles = 14,1377 + 0,390482 x Mezcla de bebida + 0,800088 x Pomasa de manzana - 0,0113553 x Mezcla de bebida² + 0,0565 x Mezcla de bebida x Pomasa de manzana + 1,71789 x Pomasa de manzana²

Polifenoles = 14,1377 + 0,390482 x Mezcla de bebida + 0,800088 x Pomasa de manzana (Ec. 28)

Con Polifenoles expresado mg EAG/100 mL.

5.7.6. Capacidad antioxidante

A continuación, la Figura 27 muestra la c. antioxidante observadas

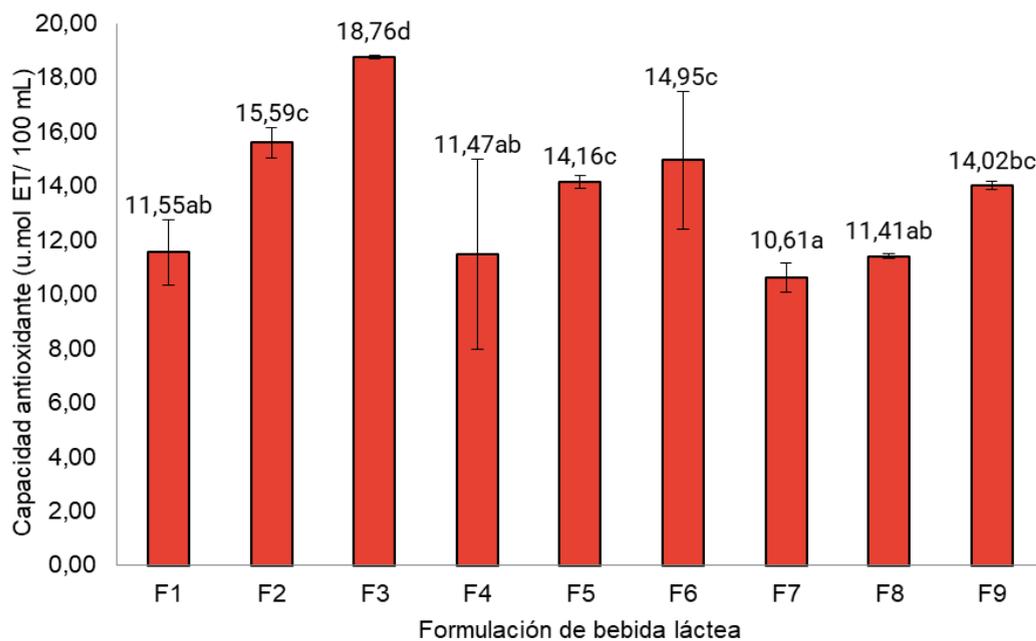


Figura 27. Capacidad antioxidante de formulaciones.
Barras de error = Desviación estándar

A partir de la Figura 27 se observa que formulación 3 presentó la mayor capacidad antioxidante siendo significativamente superior al resto de las formulaciones, por el contrario, la formulación F7 presentó la menor capacidad antioxidante. Además, la

formulación 9 presentó la capacidad antioxidante más cercana al promedio de 14,02 u.mol ET/ 100 mL siendo este resultado estadísticamente superior a la capacidad antioxidante de F1, por el contrario, la capacidad antioxidante de la formulación 9 fue significativamente inferior a F3. De acuerdo a lo informado por Arranz et al., (2019) la combinación de las proteínas de suero con ingredientes antioxidantes adicionales (como el jugo y la pomasa de manzana) aumentan la bioactividad de los productos y por lo tanto podrían usarse potencialmente en formulaciones de bebidas. En este sentido, el consumo de bebidas deportivas derivadas de fruta de manzana tendría un efecto benéfico en la salud que contribuye a la prevención de procesos degenerativos, particularmente aterosclerosis y cáncer. Estos efectos benéficos han sido atribuidos en parte a la presencia de componentes bioactivos con actividad antioxidante, cuyo mecanismo de acción es inhibir la iniciación o impedir la propagación de las reacciones de oxidación, evitándose así el daño oxidativo. Por esta razón, el consumidor debe valorar positivamente aquellos productos alimenticios que no solo le proporcionan nutrientes indispensables para la vida (hidratos de carbono, proteínas, vitaminas, etc.), sino que además posean sustancias con un posible efecto protector como es el caso de los antioxidantes. Según Robles et al., (2007) la vitamina C de la manzana aporta menos del 0,4% de la actividad antioxidante total del fruto, sugiriendo que la mezcla compleja de antioxidantes en las frutas proporcionan beneficios sobre la salud, principalmente a través de la combinación de efectos aditivos y/o sinérgicos. Esto sugiere que la mayor parte de la actividad antioxidante proviene principalmente del contenido de flavonoides y otros compuestos fenólicos (Arranz et al., 2019; Robles et al., 2007).

5.7.6.1. Ecuación de efectos estandarizados para capacidad antioxidante

Los efectos para antioxidantes están dados por la siguiente Figura 28

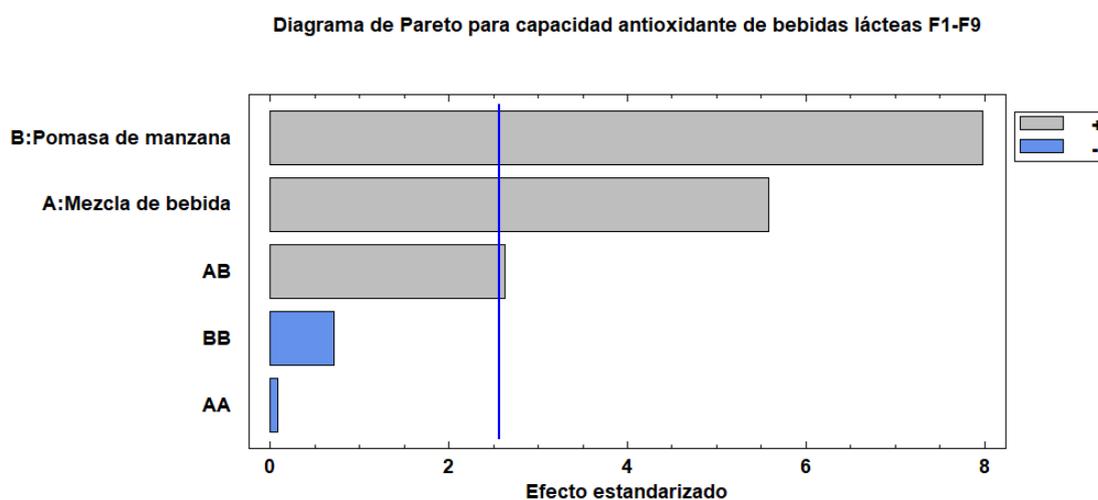


Figura 28. Diagrama de Pareto para capacidad antioxidante total

La Figura 28 muestra que los efectos de la Pomasa de manzana (8) y de la Mezcla de bebida (5,5) son significativos ya que se encuentran por delante de la línea de significancia. También la interacción entre los factores (2,5) se encuentra por delante de la línea de significancia por lo tanto también es significativa, lo que sugiere un efecto sinérgico entre los factores. En relación a lo anterior la ecuación de regresión 29 puede obtenerse de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \text{Capacidad antioxidante} = & 5,43263 - 0,193877 \times \text{Mezcla de bebida} + 4,22105 \times \\ & \text{Pomasa de manzana} - 0,000363158 \times \text{Mezcla de bebida}^2 + 0,19 \times \text{Mezcla de bebida} \times \\ & \text{Pomasa de manzana} - 1,30526 \times \text{Pomasa de manzana}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad antioxidante} = & 5,43263 - 0,193877 \times \text{Mezcla de bebida} + 4,22105 \times \\ & \text{Pomasa de manzana} + 0,19 \times \text{Mezcla de bebida} \times \text{Pomasa de manzana} \quad (\text{Ec. 29}) \end{aligned}$$

Con capacidad antioxidante expresada en u.mol ET/100 mL.

5.7.7. Proteínas

A continuación, la Figura 29 muestra el % de Proteínas observados.

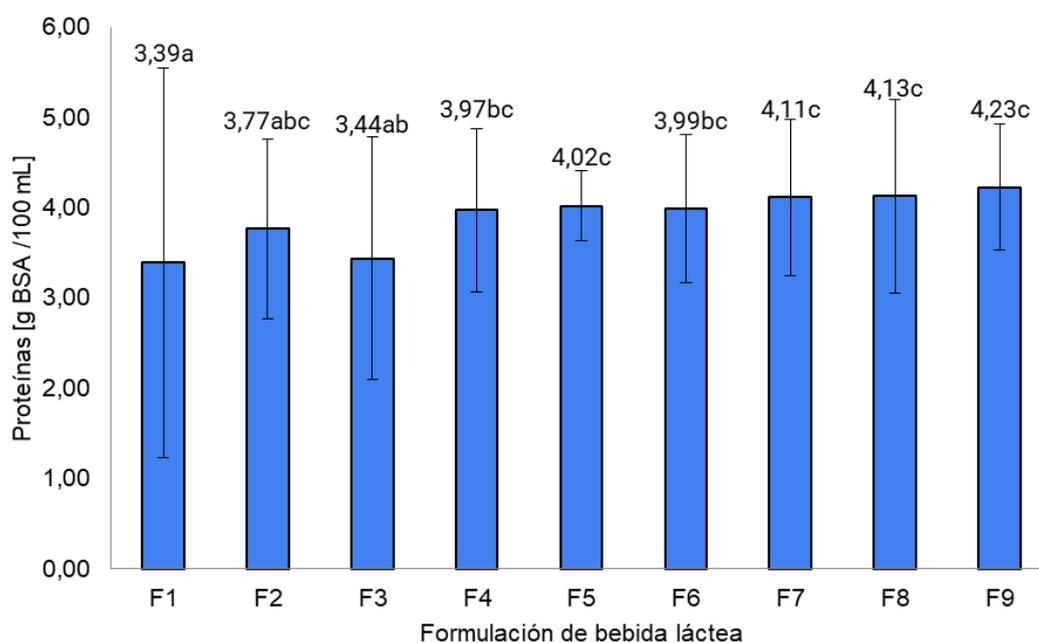


Figura 29. Contenido de proteínas de bebidas proteicas saludables
Barras de error = Desviación estándar

A partir de la Figura 29, se observa que la formulación 4 presentó el contenido de proteínas más cercano al contenido proteico promedio, siendo este resultado de 3,97 g BSA/100 mL. Este último es estadísticamente superior al contenido de proteínas de las formulaciones 1, 2 y 3. Entre estas, la formulación 1 presentó el menor contenido de proteínas, en comparación al resto de las formulaciones, siendo este significativamente inferior a F4, F5, F6, F7, F8 Y F9. Por otra parte, el contenido de proteínas promedio de las bebidas con contenidos de Mezcla = 20%, presentaron un contenido de proteínas promedio más alto, siendo este de 4,16 g BSA/100 mL, en comparación con aquellas bebidas lácteas que fueron formuladas con Mezcla = 30% (F4, F5 Y F6) con contenido de proteínas promedio de 3,99 g BSA/100 mL o con porcentaje de Mezcla = 40% con contenido de proteínas promedio de 3,53 g BSA/100 mL.

En relación a la nutrición de proteínas, esta es imperativa para apoyar la reparación metabólica y los requisitos nutricionales en deportistas, especialmente para aquellos que realizan múltiples entrenamientos o combates diarios repetidos de esfuerzo (más de dos al día) por medio de ejercicios de resistencia de alta intensidad. Después del ejercicio, hay una ventana plástica de oportunidad para reponer eficientemente los procesos de reparación y estimular la síntesis de proteínas musculares. Se ha demostrado que reponer energías después del ejercicio, idealmente dentro de los 30 minutos y no más de dos horas aumenta la síntesis de nuevas proteínas musculares. Por lo tanto, la ingesta de bebidas con proteínas provenientes de suero de leche, son una buena estrategia para el momento inmediato post-ejercicio debido a sus propiedades de absorción, dentro de esta lógica de “ventana de oportunidad”. Además, los atletas suelen utilizar la suplementación con aminoácidos ramificados (valina, leucina e isoleucina) para reducir el dolor muscular después del ejercicio intensivo y mejorar el rendimiento del entrenamiento aprovechando la ventana de absorción, específicamente suplementos de proteína de suero de leche, los cuales son una fuente de proteínas popular para los atletas. Sin embargo, la necesidad de proteínas aumenta junto con el aumento de la intensidad y duración del rendimiento atlético, y en consecuencia las recomendaciones sobre la ingesta diaria de proteínas se vuelven más heterogéneas e inconsistentes cuando la atención se centra en los atletas y deportistas. Para los atletas entrenados en resistencia y fuerza, la posición de la Asociación Dietética Estadounidense, los Dietistas de Canadá y el Colegio Estadounidense de Medicina Deportiva han recomendado una ingesta de proteínas de 1,2 a 1,7 g/kg/día. (Ahern et al., 2023; García-Iborra et al., 2023; Lynch, 2013; Wu, 2016). Esto significa que 1 L de la bebida proteica saludable obtenida con contenido de Proteínas = 4 % satisface entre el 39 y 56%, entre el 33 y 47%, y entre el 29 y 42%

de la ingesta diaria de proteínas recomendada de un atleta entrenado con peso corporal de 60, 70 y 80 kg, respectivamente.

5.7.7.1. Ecuación de efectos estandarizados para proteínas

Los efectos para proteínas están dados por la siguiente Figura 30

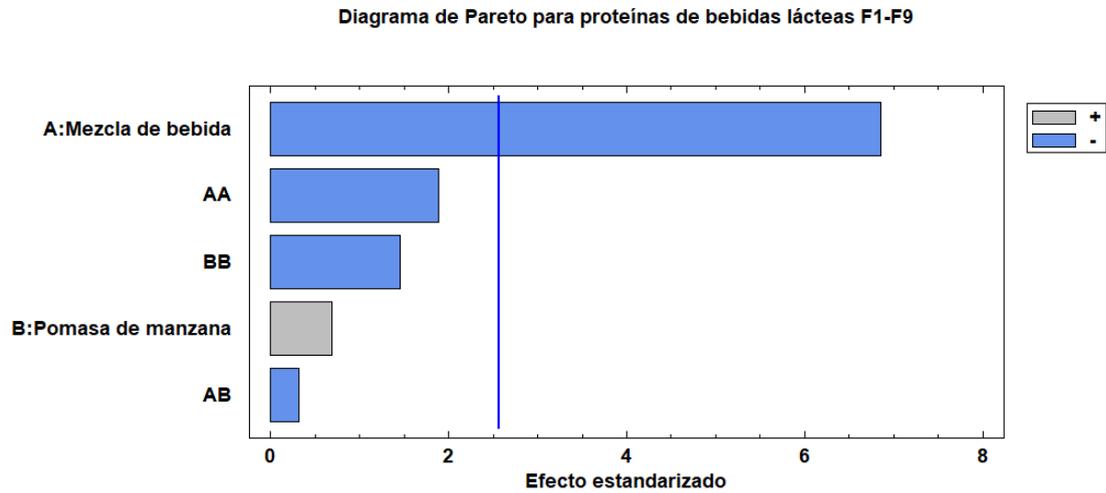


Figura 30. Diagrama de Pareto para proteínas

La Figura 30 muestra que solo el efecto de la forma lineal de la Mezcla de bebida (7) es significativo ya que se encuentra por delante de la línea de significancia. Por lo tanto, la Ecuación de regresión 30 puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\text{Proteínas} = 1,82702 + 0,0549386 \times \text{Mezcla de bebida} + 1,79781 \times \text{Pomasa de manzana} - 0,00131842 \times \text{Mezcla de bebida}^2 - 0,0035 \times \text{Mezcla de bebida} \times \text{Pomasa de manzana} - 0,407368 \times \text{Pomasa de manzana}^2$$

$$\text{Proteínas} = 1,82702 + 0,0549386 \times \text{Mezcla de bebida} \quad (\text{Ec. 30})$$

Con Proteínas expresadas en g BSA/100 mL.

5.8. Optimización mediante metodología por superficie de respuesta

A continuación, la Tabla 17 muestra el análisis estadístico de la sección previa.

Tabla 17. Resumen análisis estadístico de diseños de experimentos individuales

Parámetro	pH	Sólidos solubles	Polifenoles	Capacidad antioxidante	Proteínas
Factores significativos	<u>Valor-P</u> A: 0,0011 B: 0,0438 AA: 0,3451 AB: 0,5718 BB: 0,8367	<u>Valor-P</u> A: 0,2831 B: 1,0000 AA: 0,5200 AB: 0,1068 BB: 0,7239	<u>Valor-P</u> A: 0,0119 B: 0,0002 AA: 0,1704 AB: 0,6381 BB: 0,5714	<u>Valor-P</u> A: 0,0025 B: 0,0005 AA: 0,9392 AB: 0,0463 BB: 0,5038	<u>Valor-P</u> A: 0,0010 B: 0,5176 AA: 0,1185 AB: 0,7662 BB: 0,2057
R ²	91,63%	53,77%	96,03%	95,34%	91,68%
R ² _{ajustado}	83,26%	7,55%	92,06%	90,68%	83,37%
Ecuación del modelo ajustado	pH = 6,46754 - 0,0457368A - 0,357982B + 0,000378947 B ² + 0,0035AB + 0,0315789B ²	SS = 17,0132 - 0,338553A - 1,19474B + 0,00243421 A ² + 0,11AB - 0,526316B ²	CPT = 14,1377 + 0,390482A + 0,800088B - 0,0113553A ² + 0,0565AB + 1,71789B ²	CAT = 5,43263 - 0,193877A + 4,22105B - 0,000363158 A ² + 0,19AB - 1,30526B ²	Proteínas = 1,82702 + 0,0549386A + 1,79781B - 0,00131842 A ² - 0,0035AB - 0,407368B ²

A: Mezcla de bebida (%v/v); B: Pomasa de manzana (%m/v)

Letra en negrita indica significancia estadística ($p < 0,05$)

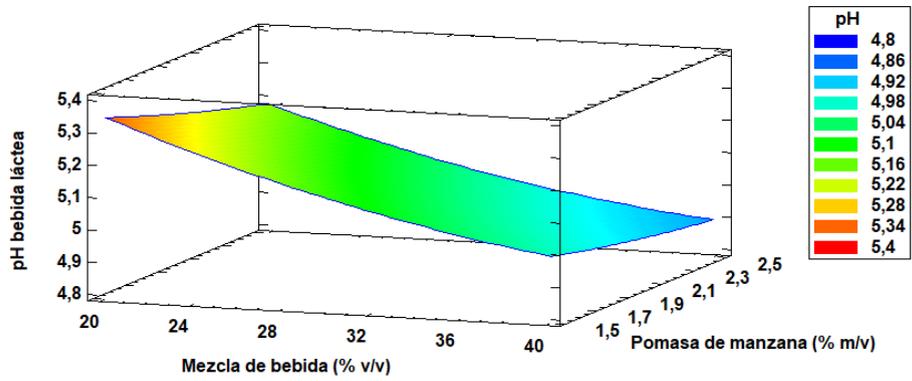
A partir de la Tabla 17 anterior se observa que los modelos diseñados para las variables de respuesta pH, contenido de polifenoles, capacidad antioxidante y proteínas presentan buenos ajustes R². Por el contrario, el modelo diseñado para la variable de respuesta sólidos solubles no presenta buen ajuste R². Esto significa que el modelo diseñado para sólidos solubles no se ajusta a los datos y no los representa adecuadamente. Lo anterior se puede deber a que no se generó una distribución satisfactoria de los puntos experimentales sobre la región experimental, en un modelo es deseable que los valores de una respuesta se distribuyan de manera uniforme sobre la región experimental. Según Gutiérrez (2012) si el modelo no explica un mínimo de

70% del comportamiento de la respuesta, no se recomienda utilizarla para fines de optimización porque su calidad de predicción es mala. En consecuencia, los modelos seleccionados para la optimización múltiple fueron los modelos para las respuestas pH, polifenoles, capacidad antioxidante y proteínas, ya que logran explicar sobre un 70% del comportamiento de la respuesta. En cuanto al coeficiente de determinación ajustado R^2_{ajustado} de estos modelos, se observa que no difieren significativamente del coeficiente de determinación R^2 . Por otra parte, se observa que al menos unos de los factores experimentales fueron significativos en las variables de respuestas con buenos ajustes. En el caso particular de la capacidad antioxidante se observa que hay un efecto significativo por parte de la interacción de los factores en estudio (AB: $p < 0,05$). Se podría especular que los antioxidantes como flavonoides y ácidos fenólicos presentes en la Mezcla de bebida, provenientes de la bebida de manzana, podrían regenerarse o estabilizarse mediante el aporte de los componentes alimentarios de la pomasa de manzana, incluidos los compuestos fenólicos y antioxidantes unidos a la fibra dietética. De acuerdo a Cömert & Gökmen (2022) la regeneración de los compuestos antioxidantes mediante compuestos antioxidantes coexistentes y su estabilización a través de otros componentes en el medio de reacción es un fenómeno bien aceptado y ampliamente estudiado, conocido como *Efecto Sinérgico* (Cömert & Gökmen, 2022; Gutiérrez, 2012).

5.8.1. Optimización de las variables de respuesta

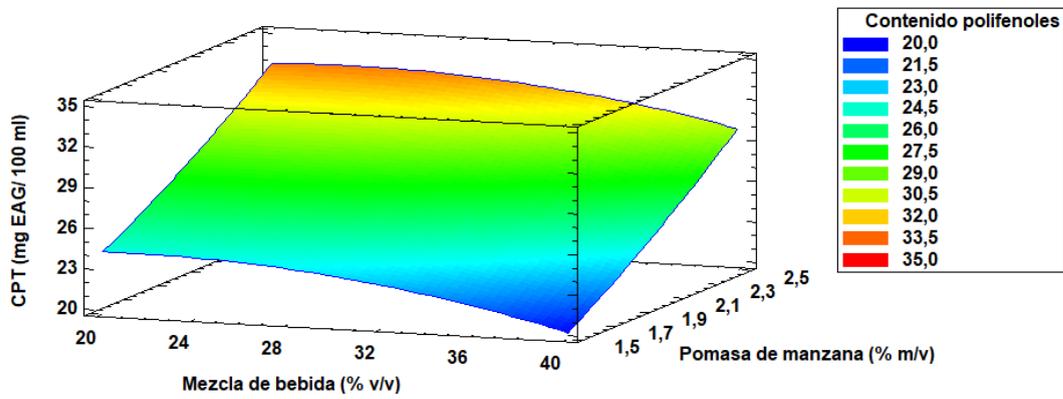
La siguiente Figura 31 (A, B, C, D) muestra las Superficies de respuesta de las variables para la optimización múltiple (pH, Polifenoles, C. antioxidante y Proteínas)

Superficie de respuesta para pH de bebidas lácteas F1-F9



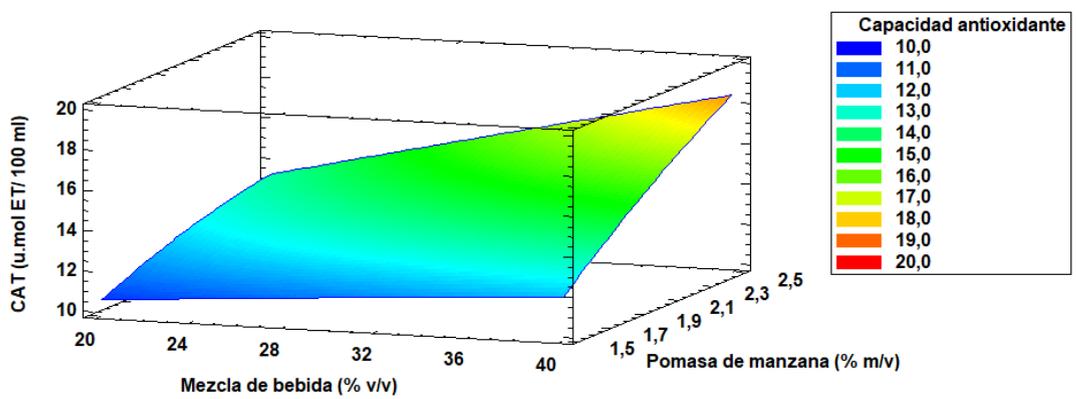
A

Superficie de respuesta para contenido de polifenoles totales de bebidas lácteas F1-F9

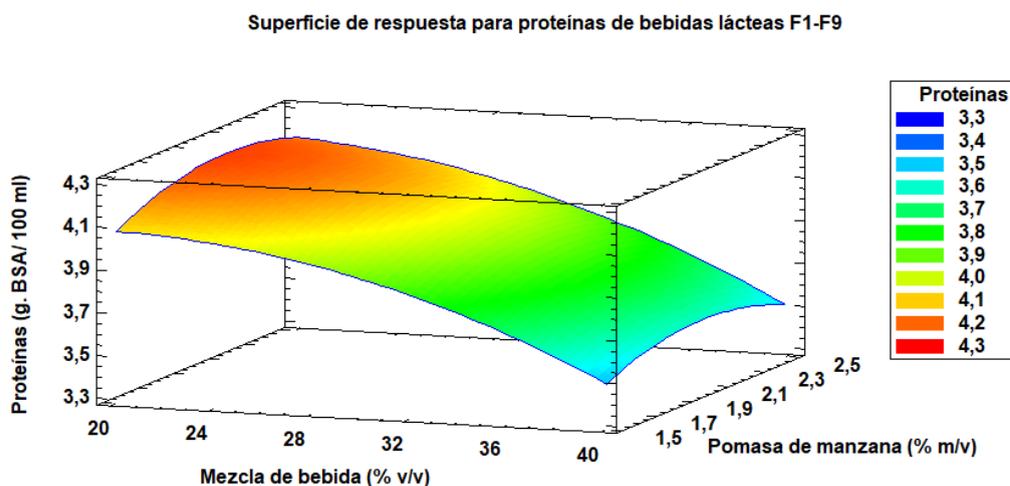


B

Superficie de respuesta para capacidad antioxidante total (CAT) de bebidas lácteas F1-F9



C



D

Figura 31. Superficies de respuestas para bebidas lácteas

A: De acuerdo a los análisis por MSR, las condiciones óptimas para la minimización de pH fueron una combinación de Mezcla = 40% y Pomasa = 2,5%, siendo el valor óptimo del pH predicho por el modelo para la bebida láctea de 4,89 (levemente ácido)

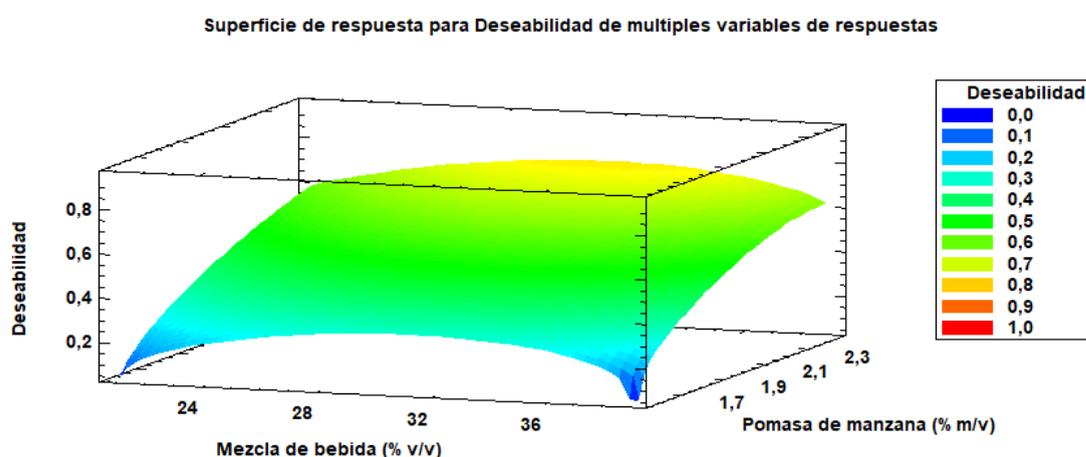
B: De acuerdo a los análisis por MSR, las condiciones óptimas para la maximización del contenido de polifenoles totales fueron una combinación de Mezcla = 23,41% y Pomasa = 2,5%, siendo el valor óptimo del contenido de polifenoles totales predicho por el modelo para la bebida láctea de 33,09 mg EAG/100 mL.

C: De acuerdo a los análisis por MSR, las condiciones óptimas para la maximización de la capacidad antioxidante fueron una combinación de Mezcla = 40% y Pomasa = 2,5%, siendo el valor óptimo de la capacidad antioxidante total predicho por el modelo para la bebida láctea de 18,49 u.mol ET/ 100 mL.

D: De acuerdo a los análisis por MSR, las condiciones óptimas para la maximización de proteínas fueron una combinación de Mezcla = 20% y Pomasa = 2,12%, siendo el valor óptimo de las proteínas predicho por el modelo para la bebida láctea de 4,23 g BSA/100 mL.

5.8.2 Optimización de múltiples variables de respuestas

La siguiente Figura 32 muestra la superficie para deseabilidad de múltiples variables.



Las condiciones óptimas para la maximización de la deseabilidad de múltiples respuestas fueron una combinación de mezcla de 31,47% jugo + 68,53% suero con un contenido pomasa de 2,5% (2,5 g pomasa/100 mL disolución), siendo el valor óptimo de la deseabilidad global predicho por el modelo para la bebida láctea de 78% (Alta).

5.9. Verificación del modelo de optimización

La Tabla 18 muestra los valores óptimos predichos y la formulación F6 experimental

Tabla 18. Valores optimizados para cada variable respuesta y su validación

Respuesta	Óptimo predicho	Óptimo experimental F6
pH	4,98	4,94 ± 0,04
Contenido de polifenoles	32,36	32,05 ± 2,54
Capacidad antioxidante	16,31	14,95 ± 2,53
Proteínas	3,92	3,99 ± 0,82
R - Pearson	99,88%	

*n = 3 repeticiones. Polifenoles expresados en mg EAG/100 mL; C. antioxidante en u.mol ET/100 mL; Proteínas en g BSA/100 mL.

La Tabla 18 muestra que los valores experimentales de la formulación F6 están estrechamente relacionados con los valores óptimos predichos por el modelo. Por lo tanto, se define esta formulación 6 como la fórmula de la máxima eficiencia, cuyo contenido proteico obtenido es 4%. Este último resultado abarca un 8% de la dosis diaria de referencia de proteína (DDR = 50 g) para adultos y niños mayores de 4 años de edad, utilizados en el etiquetado nutricional de alimentos en Chile, por cada 100 mL ingeridos de la bebida láctea formulada. Esto significa, que al considerar para el futuro, en un mediano o corto plazo, envases primarios tamaño mediano de capacidad 750 mL, para la distribución y comercialización del prototipo de bebida proteica saludable, muy similar a los utilizados por la compañía Gatorade para bebidas isotónicas línea sabor frutas tropicales, con tapa deportiva, la bebida obtenida podría suplir hasta un 20% de la DDR chilena para proteínas por porción de 250 mL. Considerando esto último, y también las resoluciones exentas N° 393/02 y 394/02, ambas del Ministerio de Salud, que figuran en el RSA, la bebida láctea puede utilizar el descriptor “Buena fuente de proteínas”, sin problemas, ya que contiene un 20% de la DDR por porción de consumo.

Por otra parte, la Tabla 18 también muestra que el coeficiente Pearson observado entre los valores óptimos predichos y experimentales es 99,88 ($R = 0,9988$). Esto significa que el diseño del modelo utilizado es adecuado para optimizar los parámetros químicos, nutricionales y funcionales de la bebida láctea. Además, estos resultados indican la idoneidad del modelo cuadrático desarrollado, diseño factorial $3^2 + 2$ no aleatorizado, y puede utilizarse eficazmente como diseño de experimentos para la optimización de múltiples variables, en estudios de formulación de prototipos de bebidas proteicas saludables a partir de suero de leche con jugo y pomasa de manzana deshidratada por secado de ventana de refractancia.

5.10. Etiquetado nutricional del producto

La Tabla 19 muestra la información nutricional del producto de bebida obtenido.

Tabla 19. Etiquetado nutricional del producto

TABLA NUTRICIONAL		
Porción: 250 mL		
Porciones por envase: 3		
	100 mL	Porción
Energía (Kcal)	60	150
Proteínas (g)*	4	10
Grasa total (g)	0,16	0,4
H. carbono disponibles (g)*	10,8	27
Azúcares totales (g)	10,8	27
Fibra total (g)	0,2	0,5
Sodio (mg)	39,2	98

* Valores nutricionales F6. Fuente: Adaptado de USDA, (2023) y RSA, (2023)

A partir de la Tabla 19 se puede observar que el producto de bebida conlleva el descriptor “buena fuente de proteínas”, ya que contiene 10 g de proteína por porción, equivalente a un 20% de la DDR, lo que ayuda a satisfacer las necesidades proteicas diarias. Contiene 0,5 g de fibra por porción, lo que contribuye a una buena digestión y a mantener la sensación de saciedad por más tiempo. El producto no contiene azúcares añadidos, lo que la convierte en una opción más saludable para mantener estables los niveles de azúcar en la sangre, además, es libre de sellos, ya que tampoco tiene adición de grasas o sodio. Por último, el modo de uso recomendado de la bebida es consumir después del ejercicio, para favorecer la recuperación muscular, o como parte de una dieta equilibrada como fuente de proteínas. Todos los cálculos realizados para la elaboración del etiquetado nutricional (Tabla 19) se detallan en el Anexo 1.

6. CONCLUSIONES

1. Los tratamientos RW80 y RW90 muestran óptimos atributos de calidad de la pomasa de manzana con menores diferencia de color total (ΔE) respecto del Control, menores índices de pardeamiento (BI), y mayores índices de blancura (WI) y concentraciones de compuestos bioactivos, sin diferencias estadísticas entre ambos tratamientos. Por lo tanto, se recomienda indistintamente usar temperaturas de 80°C y 90°C en el secado por ventana de refractancia
 2. La caracterización de las variables de respuesta químicas, nutricionales y funcionales de las formulaciones de bebidas proteicas saludables y sus efectos descritos mediante las ecuaciones de regresión simplificadas, facilitan la identificación de la formulación óptima que cumple con los criterios de ser saludables, con elevada capacidad antioxidante, provenientes del jugo y la pomasa de manzana, y también de elevado valor biológico.
 3. La optimización de las variables de respuesta en las formulaciones de bebidas lácteas permitió identificar las condiciones que maximizan la deseabilidad de los atributos deseados en la bebida láctea, en este caso proteínas y bioactivos. Se pudo definir a F6 (Mezcla de bebida 31,47% y Pomasa de manzana 2,5%) como la fórmula de la máxima eficiencia para la mejor combinación de los factores experimentales con una alta Deseabilidad (> 70%).
- ❖ Finalmente, los hallazgos de este estudio subrayan la viabilidad de valorizar subproductos agroindustriales como el suero de leche y la pomasa de manzana

deshidratada, saborizadas con jugo de manzana natural y una emulsión de cinamaldehído, para la obtención de bebidas proteicas saludables, que satisfacen las demandas del mercado de bebidas saludables, y cuyo etiquetado nutricional detallado acorde a las especificaciones del RSA y la ley 20.606 asegura que los consumidores puedan conocer los beneficios específicos de calorías, grasas, sodio, carbohidratos y proteínas, ofreciendo no solo beneficios nutricionales, sino también una alternativa sostenible para reducir desperdicios en beneficio de la economía circular.

7. ESTUDIOS FUTUROS

En términos de objetivo de estudio de formulación de un prototipo de bebida este se ha cumplido exitosamente, encontrando cantidades de Mezcla exactas para un equilibrio óptimo desde el punto de vista de la Calidad nutritiva, específicamente Proteínas y Antioxidantes. Sin embargo, estos resultados requieren ser complementados/ avanzados con otros estudios para que el producto de bebida saludable de sabor manzana pueda posicionarse finalmente en el mercado. Entre estos estudios futuros, se debe investigar la evaluación sensorial junto con la incorporación de otros ingredientes que permitan maximizar la experiencia sensitiva del consumidor. En relación a lo anterior, es necesario e importante que el producto tenga atractivos sensoriales que evoquen sensaciones placenteras, específicamente atractivos en el aroma, el sabor y la textura, con el fin de que el cliente almacene en la memoria sensorial estas experiencias, y vuelva a comprar el producto en un futuro cercano. Por otra parte, se debe investigar o monitorear la oferta de la competencia, bebidas del tipo isotónica y/o con electrolitos, por ejemplo, bebidas Gatorade o Powerade, y bebidas del tipo energética y/o con cafeína + taurina, por ejemplo, bebidas Red Bull. La facilidad de uso del producto, por ejemplo, envase, vida útil, nivel de proceso, y distribución. Por último, es necesario estudiar/ investigar los factores de personalidad o actitud, la motivación de compra, y factores que dependen de la relación entre estímulo y percepción en los consumidores de bebidas, para satisfacer las necesidades del consumidor junto con sus características, género, nivel educacional, edad, ubicación y porcentaje de la población del público objetivo. Con estas líneas, abrimos la puerta a un horizonte de posibilidades aún por explorar, donde el conocimiento futuro forjará nuevos senderos hacia la comprensión y el progreso.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar-Rosas, S. F., Ballinas-Casarrubias, L., Elias-Ogaz, L. R., Belloso, O. M., & Ortega-Rivas, E. (2013). Enzyme activity and colour changes in apple juice pasteurised thermally and by pulsed electric fields. *Acta Alimentaria*, 42(1), 45–54. <https://doi.org/10.1556/aalim.42.2013.1.5>
2. Ahern, N., Arendt, E. K., & Sahin, A. W. (2023). Protein Soft Drinks: A Retail market analysis and selected product Characterization. *Beverages*, 9(3), 73. <https://doi.org/10.3390/beverages9030073>
3. Aknola, A. A. (2018). Effective moisture diffusivity and activation energy estimation umber fruit slices using a Refractance Window™ dryer. <https://ir.unilag.edu.ng/items/741d726b-405b-439f-86d1-4584aad2eeb1>
4. Akinola, A., Ayo, D., & Ezeorah, S. (2018). Temperature Dependence of the Effective Moisture Diffusivity of Yam (*Dioscorea rotundata*) Slices Dried. . . ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26258.56002>
5. Arranz, E., Corrochano, A. R., Shanahan, C., Villalva, M., Jaime, L., Santoyo, S., Callanan, M., Murphy, E. G., & Giblin, L. (2019). Antioxidant activity and characterization of whey protein-based beverages: Effect of shelf life and gastrointestinal transit on bioactivity. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 57, 102209. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102209>
6. Arshad, M. S., & Batool, S. A. (2017). Natural Antimicrobials, their Sources and Food Safety. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70197>
7. Asif, M. (2017). Antimicrobial agents. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*, 4(3). <https://doi.org/10.15406/japlr.2017.04.00104>
8. Barukčić, I., Barukčić, I., & Božanić, R. (2018). Whey and Buttermilk—Neglected Sources of Valuable Beverages. In Elsevier eBooks (pp. 209–242). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816689-5.00008-0>
9. 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>
10. Beristain, C. I., Cruz-Sosa, F., Lobato-Calleros, C., & Verde-Calvo, J. R. (2006). Applications of soluble dietary fibers in beverages. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/312611725_Applications_of_soluble_dietary_fibers_in_beverages
11. Berk, Z. (2018). Dehydration. In Elsevier eBooks (pp. 513–566). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812018-7.00022-1>

12. Block, G., Patterson, B. H., & Subar, A. F. (1992). Fruit, vegetables, and cancer prevention: A review of the epidemiological evidence. *Nutrition and Cancer*, 18(1), 1–29. <https://doi.org/10.1080/01635589209514201>
13. Brand-Williams, W., Cuvelier, M., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/s0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/s0023-6438(95)80008-5)
14. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of Protein-Dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1–2), 248–254. <https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999>
15. Bravo, L. (1998) Polyphenols Chemistry, Dietary Sources, Metabolism, and Nutritional Significance. *Nutrition Reviews*, 56, 317-333. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1998.tb01670.x>
16. Bruin, S., & Luyben, K. C. A. (1978). Drying of food materials: a review of recent developments. In 1st. Int. Symp. Drying, Montreal, 1978.
17. Cervantes-Cardoza, V., Rocha-Guzmán, N. E., Gallegos-Infante, J. A., Rosales-Castro, M., Medina-Torres, L., & González-Laredo, R. F. (2010). Actividad antioxidante de extractos de semilla de tres variedades de manzana (*Malus domestica* Borkh -Rosaceae-). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 9(6), 446-456.
18. Ćetković G, Čanadanović-Brunet J, Djilas S, Savatović S, Mandić A, Tumbas V. (2008) Assessment of polyphenolic content and in vitro antiradical characteristics of apple pomace. *Food Chem* 109: 340–347 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.046>
19. Cömert, E. D., & Gökmen, V. (2022). Effect of food combinations and their co-digestion on total antioxidant capacity under simulated gastrointestinal conditions. *Current Research in Food Science*, 5, 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.02.008>
20. Condezo-Hoyos, L., Mohanty, I., & Noratto, G. (2014). Assessing non-digestible compounds in apple cultivars and their potential as modulators of obese faecal microbiota in vitro. *Food Chemistry*, 161, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.122>
21. Coradi, P. C., de Castro Melo, E., & Pereira Da Rocha, R. (2014). *Mathematical modeling of the drying kinetics of the leaves of lemon grass (Cymbopogon citratus Stapf) and its effects on quality* (Vol. 32).
22. 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>

23. Cruz, A. C., Guiné, R., & Gonçalves, J. (2014). Drying Kinetics and Product Quality for Convective Drying of Apples (cvs. Golden Delicious and Granny Smith). *International Journal of Fruit Science*, 15(1), 54–78. <https://doi.org/10.1080/15538362.2014.931166>
24. Das, A. B., Goud, V. V., & Das, C. K. (2019). Phenolic compounds as functional ingredients in beverages. In Elsevier eBooks (pp. 285–323). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816687-1.00009-6>
25. De La Peña-Armada, R., & Mateos-Aparicio, I. (2022). Sustainable Approaches Using Green Technologies for Apple By-Product Valorisation as A New Perspective into the History of the Apple. *Molecules*, 27(20), 6937. <https://doi.org/10.3390/molecules27206937>
26. Demiray, E., Yazar, J. G., Aktok, Ö., Çulluk, B., Koç, G. Ç., & Pandiselvam, R. (2023). The effect of drying temperature and thickness on the drying kinetic, antioxidant activity, phenolic compounds, and color values of apple slices. *Journal of Food Quality*, 2023, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2023/7426793>
27. Dhenge, R., Langialonga, P., Alinovi, M., Lolli, V., Aldini, A., & Rinaldi, M. (2022). Evaluation of quality parameters of orange juice stabilized by two thermal treatments (helical heat exchanger and ohmic heating) and non-thermal (high-pressure processing). *Food Control*, 141, 109150. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109150>
28. Đjekić, I., Tomić, N., Bourdoux, S., Spilimbergo, S., Šmigić, N., Udovički, B., Hofland, G. W., Devlieghere, F., & Rajković, A. (2018). Comparison of three types of drying (supercritical CO₂, air and freeze) on the quality of dried apple – Quality index approach. *LWT*, 94, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.029>
29. Doyle, A. A., & Stephens, J. C. (2019). A review of cinnamaldehyde and its derivatives as antibacterial agents. *Fitoterapia*, 139, 104405. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2019.104405>
30. Drewnowski, A., & Gomez-Carneros, C. (2000). Bitter taste, phytonutrients, and the consumer: a review. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 72(6), 1424–1435. <https://doi.org/10.1093/ajcn/72.6.1424>
31. Duan, N., Bai, Y., Sun, H., Wang, N., Ma, Y., Li, M., Wang, X., Jiao, C., Legall, N., Mao, L., Wan, S., Wang, K., He, T., Feng, S., Zhang, Z., Mao, Z., Shen, X., Chen, X., Jiang, Y., . . . Chen, X. (2017). Genome re-sequencing reveals the history of apple and supports a two-stage model for fruit enlargement. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00336-7>
32. FAOSTAT. (2023). Production/Yield of Whole Cow's Milk Cheese in the World. Available at: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>

33. Franco, S. G., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., Núñez, H., Ramírez, C., & Simpson, R. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.001>
34. García, L. A., & Herrero, M. (2010). *Tecnología de la elaboración de sidra. Equipamiento industrial Cantabrian Sea Actinobacteria, both oceanic and atmospheric, as a novel source of bioactive natural products View project Generación, Uso y Evaluación de Recursos Didácticos Digitales View project*. <https://www.researchgate.net/publication/276265061>
35. García-Iborra, M., Castanys-Muñoz, E., Oliveros, E., & Ramírez, M. Á. A. (2023). Optimal protein intake in healthy children and Adolescents: Evaluating current evidence. *Nutrients*, 15(7), 1683. <https://doi.org/10.3390/nu15071683>
36. García-Pascual, P., Sanjuán, N., Melis, R., & Mulet, A. (2006). Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling. *Journal of Food Engineering*, 72(4), 346–353. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.014>
37. Gerhauser C. (2008). Cancer chemopreventive potential of apples, apple juice, and apple components. *Planta medica*, 74(13), 1608–1624. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1088300>
38. Ghinea, C., Prisacaru, A. E., & Leahu, A. (2022). Physico-Chemical and sensory quality of Oven-Dried and Dehydrator-Dried apples of the Starkrimson, Golden Delicious and Florina cultivars. *Applied Sciences*, 12(5), 2350. <https://doi.org/10.3390/app12052350>
39. Gibson, D. G., Glass, J. I., Lartigue, C., Noskov, V. N., Chuang, R. Y., Algire, M. A., Benders, G. A., Montague, M., Ma, L., Moodie, M., Merryman, C., Vashee, S., Krishnakumar, R., Assad-García, N., Andrews-Pfannkoch, C., Denisova, E. A., Young, L. S., Qi, Z., Segall-Shapiro, T. H., . . . Venter, J. C. (2010). Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, 329(5987), 52–56. <https://doi.org/10.1126/science.1190719>
40. Gimhani, K., & Liyanage, C. J. (2019). Development and quality evaluation of ready to drink fruit flavoured whey beverage. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 9(8), p92107. <https://doi.org/10.29322/ijsrp.9.08.2019.p92107>
41. Gutierrez, H. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Capítulo 12: Optimización de procesos con metodología de superficie de respuesta en A. Delgado (Ed.), *Análisis y Diseño de Experimentos* (Tercera ed., pp. 367-368). Editorial McGRAW-Hill.
42. Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory, II. Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.

43. Howatson, G., Hoad, M., Goodall, S., Tallent, J., Bell, P. G., & French, D. N. (2012). Exercise-induced muscle damage is reduced in resistance-trained males by branched chain amino acids: a randomized, double-blind, placebo controlled study. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/1550-2783-9-20>
44. Huang, X., Li, Y., Zhou, X., Wang, J., Zhang, Q., Yang, X., Zhu, L., & Geng, Z. (2022). Prediction of Apple Slices Drying Kinetic during Infrared-Assisted-Hot Air Drying by Deep Neural Networks. *Foods*, 11(21), 3486. <https://doi.org/10.3390/foods11213486>
45. Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 08(02), 27–48. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>
46. Ip, R. W., & Wan, E. I. C. (2011). New use heat transfer theories for the design of heat setting machines for precise Post-Treatment of dyed fabrics. *Defect and Diffusion Forum*, 312–315, 748–751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.312-315.748>
47. 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>
48. Jackman, S. R., Witard, O. C., Philp, A., Wallis, G. A., Baar, K., & Tipton, K. D. (2017). Branched-Chain Amino Acid Ingestion Stimulates Muscle Myofibrillar Protein Synthesis following Resistance Exercise in Humans. *Frontiers in Physiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00390>
49. Jäger, R., Kerksick, C. M., Campbell, B., Cribb, P. J., Wells, S., Skwiat, T. M., Purpura, M., Ziegenfuss, T. N., Ferrando, A. A., Arent, S. M., Smith-Ryan, A. E., Stout, J. R., Arciero, P. J., Ormsbee, M. J., Taylor, L., Wilborn, C., Kalman, D., Kreider, R. B., Willoughby, D. S., . . . António, J. (2007). International Society of Sports Nutrition position stand: protein and exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/1550-2783-4-8>
50. Jelen, P. (1992) Whey: Composition, properties, processing and uses in encyclopedia of food science and technology. In: Hui, Y. H., Ed., *Encyclopedia of Food Science and Technology*, John Wiley & Sons, New York, 2835-2845.
51. Jin, Q., & Kirk, M. F. (2018). pH as a Primary Control in Environmental Microbiology: 1. Thermodynamic Perspective. *Frontiers in Environmental Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00021>

52. Kammerer DR, Kammerer J, Valet R, Carle R. (2014). Recovery of polyphenols from the by-products of plant food processing and application as valuable food ingredients. *Food Res Int* 65: 2–12 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.012>
53. Kahraman, O., Malvandi, A., Vargas, L., & Feng, H. (2021). Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105510. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105510>
54. Karaman, K., Sağdıç, O., & Yılmaz, M. T. (2020). Potential of natamycin to control growth of *Zygosaccharomyces* spp. in apple juice during storage. *International Journal of Food Microbiology*, 332, 108771. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108771>
55. 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>
56. Kidoń, M., & Grabowska, J. (2021). Bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory qualities of red-fleshed apples dried by different methods. *LWT*, 136, 110302. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110302>
57. Kim, C., & Ndegwa, E. (2018). Influence of pH and temperature on growth characteristics of leading foodborne pathogens in a laboratory medium and select food beverages.
58. Kim, D., Kim, S. H., Jeong, W., & Lee, H. (2013). Effect of BCAA intake during endurance exercises on fatigue substances, muscle damage substances, and energy metabolism substances. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 17(4), 169–180. <https://doi.org/10.5717/jenb.2013.17.4.169>
59. Kobus, Z., Nadulski, R., Anifantis, A. S., & Santoro, F. (2018). Effect of press construction on yield of pressing and selected quality characteristics of apple juice. *Engineering for Rural Development*. <https://doi.org/10.22616/erdev2018.17.n306>
60. Kolodziejczyk K, Kosmala M, Milala J, Sojka M, Uczciwek M, Krol B, Markowski J, Renard CMGC. (2010) Characterisation of the chemical composition of scab-resistant apple pomaces. *J Hortic Sci Biotechnol* 84: 89–95 <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512602>
61. Koutsos, A., Tuohy, K. M., & Lovegrove, J. A. (2015). Apples and cardiovascular health--is the gut microbiota a core consideration?. *Nutrients*, 7(6), 3959–3998. <https://doi.org/10.3390/nu7063959>
62. Krawitzky M, Arias E, Peiro JM, Negueruela AI, Val J, Oria R. (2014). Determination of color, antioxidant activity, and phenolic profile of different fruit tissue of Spanish ‘Verde Doncella’ apple cultivar. *Int J Food Prop* 17: 2298–2311 <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.792829>

63. Kriaa, K., & Nassar, A. F. (2020). Study of gala apples (*Malus pumila*) thin-layer microwave drying: drying kinetics, diffusivity, structure and color. *Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1590/fst.26420>
64. Kruczek, M., Gumul, D., Korus, A., Buksa, K., & Ziobro, R. (2023). Phenolic Compounds and Antioxidant Status of Cookies Supplemented with Apple Pomace. *Antioxidants*, *12*(2), 324. <https://doi.org/10.3390/antiox12020324>
65. Kumar, M., Madhumita, M., Prabhakar, P. K., & Basu, S. (2022). Refractance window drying of food and biological materials: Status on mechanisms, diffusion modelling and hybrid drying approach. *Critical reviews in food science and nutrition*, 1–24. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2132210>
66. Lakshmi, D., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, *120*, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.053>
67. Lawlor, K. A., Schuman, J. D., Simpson, P. G., & Taormina, P. J. (2009). Microbiological spoilage of beverages. In Springer eBooks (pp. 245–284). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0826-1_9
68. Lee, C. Y., & Smith, N. L. (2000). Apples: an important source of antioxidants in the American diet. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/237815367_Apples_An_Important_Source_of_Antioxidants_in_the_American_Diet
69. Lemus, R., Pérez, M., Andrés, A., Roco, T., Tello, C. M., & Vega, A. (2008). Kinetic study of dehydration and desorption isotherms of red alga *Gracilaria*. *LWT*, *41*(9), 1592–1599. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.10.011>
70. Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Moraga, N. O., & Astudillo, S. (2014). Dehydration of *Stevia rebaudiana* Bertoni Leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features. *Journal of Food Processing and Preservation*, *39*(5), 508–520. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12256>
71. Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *13*(5), 427-432. <http://dx.doi.org/10.1021/ie50137a021>.
72. Liberatore, C. M., Cirlini, M., Ganino, T., Rinaldi, M., Tomaselli, S., & Chiancone, B. (2021). Effects of Thermal and High-Pressure Processing on Quality Features and the Volatile Profiles of Cloudy Juices Obtained from Golden Delicious, Pinova, and Red Delicious Apple Cultivars. *Foods*, *10*(12), 3046. <https://doi.org/10.3390/foods10123046>
73. Lynch, S. J. (2013). The differential effects of a complex protein drink versus isocaloric carbohydrate drink on performance indices following

- high-intensity resistance training: a two arm crossover design. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 10(1).
<https://doi.org/10.1186/1550-2783-10-31>
74. Lucas-González, R., Yilmaz, B., Khaneghah, A. M., Hano, C., Shariati, M. A., Bangar, S. P., Gökşen, G., Dhama, K., & Lorenzo, J. M. (2023). Cinnamon: An antimicrobial ingredient for active packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 35, 101026.
<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101026>
75. Mavropoulou, I., & Kosikowski, F. (1973). Composition, solubility, and stability of whey powders. *Journal of Dairy Science*, 56(9), 1128–1134.
[https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(73\)85321-4](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(73)85321-4)
76. Mazorra-Manzano, M.A., & Moreno-Hernández, J.M. (2019). Properties and options to valorize the whey from the artisanal cheese factory. *CienciaUAT*, 14(1), 133. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1134>
77. Mehmood, A. M. M. T., Iyer, A. B., Arif, S., Junaid, M., Khan, R. S., Nazir, W., & Khalid, N. (2019). Whey protein-based functional energy drinks formulation and characterization. In *Sports and Energy Drinks: Volume 10: The Science of Beverages*. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815851-7.00005-X>
78. Meléndez-Martínez, A. J., Gómez-Robledo, L., Melgosa, M., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2011). Color of orange juices in relation to their carotenoid contents as assessed from different spectroscopic data. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(6), 837–844.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.05.001>
79. Mirzaee, E., Rafiee, S., Keyhani, A., & Emam-Djomeh, Z. (2009). Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. *Research in Agricultural Engineering*, 55(3), 114–120.
<https://doi.org/10.17221/8/2009-rae>
80. Modi, P. I., Parikh, J. K., & Desai, M. A. (2019). Sonohydrodistillation: Innovative approach for isolation of essential oil from the bark of cinnamon. *Industrial Crops and Products*, 142.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111838>
81. Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011). Colour difference δE - A survey. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/286061341_Colour_difference_dE_-_A_survey
82. Monirujjaman, M., & Ferdouse, A. (2014). Metabolic and physiological roles of Branched-Chain amino acids. *Advances in Molecular Biology*, 2014, 1–6.
<https://doi.org/10.1155/2014/364976>

83. 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>
84. 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>
85. Nadulski, R., Kobus, Z., Guz, T., Strzałkowska, K., & Kosik, D. (2014). Przydatności wybranych odmian jabłek do tłoczenia w warunkach gospodarskich. *Agricultural Engineering*. <https://doi.org/10.14654/ir.2014.149.016>
86. Nadulski, R., Kobus, Z., Wilczyński, K., Zawislak, K., Grochowicz, J., & Guz, T. (2016). Application of Freezing and Thawing in Apple (*Malus domestica*) Juice Extraction. *Journal of Food Science*, 81(11). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13514>
87. Nguyen, T., Nguyen, Q., & Nguyen, P. (2022). Drying kinetics and changes of total phenolic content, antioxidant activity and color parameters of mango and avocado pulp in refractance window drying. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 27–38. <https://doi.org/10.31883/pjfns/144835>
88. Nindo, C., Feng, H., Shen, G., Tang, J., & Kang, D. H. (2003). ENERGY UTILIZATION AND MICROBIAL REDUCTION IN a NEW FILM DRYING SYSTEM. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(2), 117–136. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2003.tb00506.x>
89. 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>
90. ODEPA. (2019). Description of the Dairy Chain in Chile. Office of Agrarian Studies and Policies. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/descripcion-de-la-cadena-la-ctea-en-chile>
91. ODEPA. (2023). Annual milk bulletin. Office of Agrarian Studies and Policies. <https://www.odepa.gob.cl/contenidos-rubro/boletines-del-rubro/boletin-anual-de-la-leche>
92. Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599–618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>

93. Opyd, P. M., Jurgoński, A., Juśkiewicz, J., Milala, J., Zduńczyk, Z., & Król, B. (2017). Nutritional and Health-Related effects of a diet containing apple seed meal in rats: the case of amygdalin. *Nutrients*, 9(10), 1091. <https://doi.org/10.3390/nu9101091>
94. Ortiz-Choez, C.A. 2015. Acción antimicrobiana de soluciones formadoras de recubrimientos comestibles a base de quitosano y extracto hidroalcohólico de mango (*Mangifera indica*) frente a microorganismos de interés sanitario. Trabajo de titulación presentado como requisito previo para optar al grado de Químico y Farmacéutico. Universidad de Guayaquil, Ecuador. 82 p.
95. Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., & Ochoa-Martínez, C. I. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioproducts Processing*, 95, 237–253. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010>
96. Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., & Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 0112–0113. <https://doi.org/10.13031/2013.37459>
97. Padayachee A, Netzel G, Netzel M, Day L, Zabarar D, Mikkelsen D, Gidley MJ. (2012) Binding of polyphenols to plant cell wall analogues – part 2: phenolic acids. *Food Chem* 135: 2287–2292 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.004>
98. Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers (M. Sc. thesis). Purdue University, West Lafayette
99. Palomo, I.; Yuri, J.A.; Moore-Carrasco, R.; Quilodrán, A. y Neira, A. 2010. El consumo de manzanas contribuye a prevenir el desarrollo de enfermedades cardiovasculares y cáncer: antecedentes epidemiológicos y mecanismos de acción. *Revista Chilena de Nutrición* 37(3): 377-385
100. Pavan, M. A., Schmidt, S. J., & Feng, H. (2012). Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air Página 94 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>
101. Pelegrine, D. H. G., & Gasparetto, C. A. (2005). Whey proteins solubility as function of temperature and pH. *LWT*, 38(1), 77–80. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.03.013>
102. Pereira, W. A., Pereira, C. D. S., Assunção, R. G., Silva, I. S. C., Rego, F. S., Alves, L. S. R., Santos, J. B. O., Nogueira, F. J. R., Zagmignan, A., Thomsen, T. T., Løbner-Olesen, A., Krogfelt, K. A., Da Silva, L. C. N., & Abreu, A. G. (2021). New Insights into the Antimicrobial Action of Cinnamaldehyde towards *Escherichia coli* and Its Effects on Intestinal Colonization of Mice. *Biomolecules*, 11(2), 302. <https://doi.org/10.3390/biom11020302>

103. Phillip., T. C. (2004). REFRACTANCE WINDOW TM - "DOWN UNDER. roc. 2004 IDS 14th Int. Drying Symposium
104. Pichon, L., Potier, M., Tomé, D., Mikogami, T., Laplaize, B., Martin-Rouas, C., & Fromentin, G. (2007). High-protein diets containing different milk protein fractions differently influence energy intake and adiposity in the rat. *British Journal of Nutrition*, 99(4), 739–748. <https://doi.org/10.1017/s0007114507831709>
105. Picouet, P., Landl, A., Abadías, M., Castellari, M., & Viñas, I. (2009). Minimal processing of a Granny Smith apple purée by microwave heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10(4), 545–550. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.05.007>
106. Polezhaev, Y. V. (2011). THERMAL CONDUCTIVITY. In Begellhouse eBooks. https://doi.org/10.1615/atoz.t.thermal_conductivity
107. Pombo, A. F. W., Stephani, R., Perrone, Í. T., Silva, M. L. S. E., & Silva, Á. a. P. (2022). Modified Fleischmann's lactometer method for sweet whey total solids estimation. *International Dairy Journal*, 126, 105228. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105228>
108. Poveda E, Elpidia. (2013). Whey, generalities and potential use as source of calcium from high bioavailability. *Revista chilena de nutrición*, 40(4), 397-403. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182013000400011>
109. Puente-Díaz, L., Spolmann, O., Nocetti, D., Zura-Bravo, L., & Lemus-Mondaca, R. (2020). Effects of Infrared-Assisted Refractance WindowTM drying on the drying kinetics, microstructure, and color of Physalis fruit purée. *Foods*, 9(3), 343. <https://doi.org/10.3390/foods9030343>
110. Rabetafika, H., Bchir, B., Blecker, C., & Richel, A. (2014). Fractionation of apple by-products as source of new ingredients: Current situation and perspectives. *Trends in Food Science and Technology*, 40(1), 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.08.004>
111. Rajoriya, D., Bhavya, M., & Hebbar, H. U. (2021). Impact of process parameters on drying behaviour, mass transfer and quality profile of refractance window dried banana puree. *LWT*, 145, 111330. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111330>
112. Rajoriya, D., Shewale, S. R., & Hebbar, H. U. (2019). Refractance window drying of apple slices: mass transfer phenomena and quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 12(10), 1646–1658. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02334-7>
113. RSA. (2023). Párrafo II. De los Alimentos para Deportistas <https://www.dinta.cl/wp-content/uploads/2023/03/RSA-decreto-977-96-act-al-26-01-23.pdf>

114. Robbins, R.J. (2003) Phenolic Acids in Foods: An Overview of Analytical Methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 2866-2887. <https://doi.org/10.1021/jf026182t>
115. Robles-Sánchez, Maribel, Gorinstein, Shela, Martín-Belloso, Olga, Astiazarán-García, Humberto, González-Aguilar, Gustavo, & Cruz-Valenzuela, Reinaldo. (2007). Frutos tropicales mínimamente procesados: Potencial antioxidante y su impacto en la salud. *Interciencia*, 32(4), 227-232. Recuperado en 18 de febrero de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-1844200700040005&lng=es&tlng=es.
116. Rydzak, L., Kobus, Z., Nadulski, R., Wilczyński, K., Pecyna, A., Santoro, F., Sagan, A., Starek-Wójcicka, A., & Krzywicka, M. (2020). Analysis of selected physicochemical properties of commercial apple juices. *Processes*, 8(11), 1457. <https://doi.org/10.3390/pr8111457>
117. 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>
118. Sandra, S., Ho, M. T., Alexander, M., & Corredig, M. (2012). Effect of soluble calcium on the renneting properties of casein micelles as measured by rheology and diffusing wave spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, 95(1), 75–82. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4713>
119. Senadeera, W., Bhandari, B., Young, G., & Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 58(3), 277–283. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(02\)00386-2](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(02)00386-2)
120. Sanoner P, Guyot S, Marnet N, Molle D, Drilleau JP. (1999) Polyphenol profiles of French cider apple varieties (*Malus domestica* sp.). *J Agric Food Chem* 47: 4847–4853 <https://doi.org/10.1021/jf990563y>
121. Segura, L. I., Salvadori, V. O., & Goñi, S. M. (2017). Characterisation of liquid food colour from digital images. *International Journal of Food Properties*, 20(sup1), S467–S477. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1299758>
122. 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>
123. Shinohara, K., Ohashi, Y., Kawasumi, K., Terada, A., & Fujisawa, T. (2010). Effect of apple intake on fecal microbiota and metabolites in humans. *Anaerobe*, 16(5), 510–515. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2010.03.005>

124. Silva, P.S., Antonio, R.P., Dantas, D.A., & Nunes, G.H. (2006). JUICE EXTRACTION FOR TOTAL SOLUBLE SOLIDS CONTENT DETERMINATION IN MELON. *Revista Caatinga*, 19, 268-271.
125. Singleton, V.L. y Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144–158
126. Skryplonek, K., Dmytrów, I., & Mituniewicz-Małek, A. (2019). Probiotic fermented beverages based on acid whey. *Journal of Dairy Science*, 102(9), 7773–7780. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16385>
127. Tello-Ireland, C., Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., López, J., & Di Scala, K. (2011). Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. *LWT*, 44(10), 2112–2118. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.06.008>
128. Thirapanmethee, K., Kanathum, P., Khuntayaporn, P., Huayhongthong, S., Surassmo, S., & Chomnawang, M. T. (2021). Cinnamaldehyde: A plant-derived antimicrobial for overcoming multidrug-resistant *Acinetobacter baumannii* infection. *European Journal of Integrative Medicine*, 48, 101376. <https://doi.org/10.1016/j.eujim.2021.101376>
129. Tsakali, E., Petrotos, K., D'Alessandro, A. G., & Goulas, P. (2010). A review on whey composition and the methods used for its utilization for food and pharmaceutical products. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/281839469_A_review_on_whey_composition_and_the_methods_used_for_its_utilization_for_food_and_pharmaceutical_products
130. Tsao, R. (2010) Chemistry and Biochemistry of Dietary Polyphenols. *Nutrients*, 2, 1231-1246. <http://dx.doi.org/10.3390/nu2121231>
131. Tsao, R., Yang, R., Young, J. C., & Zhu, H. (2003). Polyphenolic profiles in eight Apple cultivars using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(21), 6347–6353. <https://doi.org/10.1021/jf0346298>
132. Tunick, M. H., Thomas-Gahring, A., Van Hekken, D., Iandola, S. K., Singh, M., Qi, P. X., Ukuku, D. O., Mukhopadhyay, S., Onwulata, C., & Tomasula, P. M. (2016). Physical and chemical changes in whey protein concentrate stored at elevated temperature and humidity. *Journal of Dairy Science*, 99(3), 2372–2383. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10256>
133. USDA. (2023). Fresh Deciduous Fruit: World Markets World market and trade. Obtenido de <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/fruit.pdf>
134. USDA. (2023.). FoodData Central <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/173933/nutrients>

135. Uribe, E., Gómez-Pérez, L. S., Pastén, A., Pardo, C. R., Puente, L., & Vega-Gálvez, A. (2022). Assessment of refractive window drying of physalis (*Physalis peruviana* L.) puree at different temperatures: drying kinetic prediction and retention of bioactive components. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(4), 2605–2615. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01373-7>
136. Vallée Marcotte, B., Verheyde, M., Pomerleau, S., Doyen, A., & Couillard, C. (2022). Health Benefits of Apple Juice Consumption: A Review of Interventional Trials on Humans. In *Nutrients* (Vol. 14, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nu14040821>
137. Vega, A., Fito, P., Andrés, A., & Lemus, R. (2007). Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1460–1466. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.028>
138. Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., & Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.029>
139. Vijayalakshmi, S., Mahboob, S., Al-Ghanim, K. A., Ahmed, Z., Al-Mulhm, N., & Govindarajan, M. (2021). A review on microbial degradation of drinks and infectious diseases: A perspective of human well-being and capabilities. *Journal of King Saud University - Science*, 33(2), 101293. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101293>
140. Vijayan, S., Arjunan, T., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.014>
141. Vizzotto, M., Da R Fetter, M., Pereira, M. C., & Corbelini, D. D. (2012). Apple: Extraction optimization of antioxidant compounds and determination of total phenolic amount and antioxidant activity on product and co-product. *Acta Horticulturae*, 939, 331–336. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.939.43>
142. Vrhovsek U, Rigo A, Tonon D, Mattivi F. (2004). Quantitation of polyphenols in different apple varieties. *J Agric Food Chem* 52: 6532–6538 <https://doi.org/10.1021/jf049317z>
143. Waldbauer, K., McKinnon, R., & Kopp, B. (2017). Apple Pomace as Potential Source of Natural Active Compounds. In *Planta Medica* (Vol. 83, Issues 12–13, pp. 994–1010). Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/s-0043-111898>

144. Wedholm, A., Møller, H. S., Stensballe, A., Lindmark-Månsson, H., Karlsson, A. H., Andersson, R., Andrén, A., & Larsen, L. B. (2008). Effect of minor milk proteins in chymosin separated whey and casein fractions on cheese yield as determined by proteomics and multivariate data analysis. *Journal of Dairy Science*, 91(10), 3787–3797. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1022>
145. Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18(3), 293–297. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>
146. Wibowo, S., Vervoort, L., Tomić, J., Santiago, J. S., Lemmens, L., Panozzo, A., Grauwet, T., Hendrickx, M., & Van Loey, A. (2015). Colour and carotenoid changes of pasteurised orange juice during storage. *Food Chemistry*, 171, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.007>
147. Whetstine, M. C., Croissant, A., & Drake, M. (2005). Characterization of dried whey protein concentrate and isolate flavor. *Journal of Dairy Science*, 88(11), 3826–3839. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(05\)73068-x](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(05)73068-x)
148. Wojdyło, A., Oszmiański, J., & Laskowski, P. (2008). Polyphenolic compounds and antioxidant activity of new and old apple varieties. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(15), 6520–6530. <https://doi.org/10.1021/jf800510j>
149. Wu, G. (2016). Dietary protein intake and human health. *Food & Function*, 7(3), 1251–1265. <https://doi.org/10.1039/c5fo01530h>
150. Zagal, C. G. (2013). *Febrero de 2013*. www.odepa.gob.cl
151. 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>
152. Zhu, D., Shen, Y., Xu, L., Cao, X., ChangXin, L., & Li, J. (2019). Browning and Flavor Changing of Cloudy Apple Juice during Accelerated Storage. *IOP Conference Series*, 611(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/611/1/012061>
153. Żywica, R., & Banach, J. (2019). Mathematical correlations between selected quality attributes and electrical parameters of apple juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14107>

9. ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de los valores nutricionales para 1 porción (250 mL) de bebida

$$\text{Proteínas(\% Proteínas formula 6)} = \frac{4 \text{ g}}{100 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} = \frac{10 \text{ g}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\% \text{DDR Proteína} = \frac{\text{proteínas (g)}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{1}{\text{DDR proteínas}} \times 100\%$$

$$\% \text{DDR Proteína} = \frac{10 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{1}{50 \text{ g}} \times 100\% = 20\% \text{ (buena fuente)}$$

$$\text{Grasa total} = \frac{0,2 \text{ g}}{100 \text{ mL suero}} \times \frac{175 \text{ mL suero}}{250 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} = \frac{0,35 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} = \frac{0,4 \text{ g}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\text{Fibra total} = \text{Fibra (jugo)} + \text{Fibra (pomasa)}$$

$$\text{Fibra (jugo)} = \frac{0,2 \text{ g}}{100 \text{ mL jugo}} \times \frac{75 \text{ mL jugo}}{250 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} = \frac{0,15 \text{ g}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\text{Fibra (pomasa)} = \frac{2,4 \text{ g}}{100 \text{ g pomasa}} \times \frac{2,5 \text{ g pomasa}}{250 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} = \frac{0,06 \text{ g}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\Rightarrow \text{Fibra total} = \frac{0,15 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} + \left(\frac{0,06 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{1 \text{ g base húmeda}}{0,2 \text{ g base seca}} \right) = \frac{0,45 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \approx \frac{0,5 \text{ g}}{1 \text{ Porción}}$$

H. de carbono disponibles = Azúcares totales (°Brix formula 6) + almidones

$$\text{H. de carbono disponibles} = \frac{10,8 \text{ g}}{100 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} + 0 = \frac{27 \text{ g}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\text{Sodio total} = \text{Sodio (suero)} + \text{Sodio (jugo)}$$

$$\text{Sodio (suero)} = \frac{54 \text{ mg}}{100 \text{ mL suero}} \times \frac{175 \text{ mL suero}}{250 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} = \frac{94,5 \text{ mg}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\text{Sodio (jugo)} = \frac{4 \text{ mg}}{100 \text{ mL suero}} \times \frac{75 \text{ mL jugo}}{250 \text{ mL solución}} \times \frac{250 \text{ mL solución}}{1 \text{ Porción}} = \frac{3 \text{ mg}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\Rightarrow \text{Sodio total} = \frac{94,5 \text{ mg}}{1 \text{ Porción}} + \frac{3 \text{ mg}}{1 \text{ Porción}} = \frac{97,5 \text{ mg}}{1 \text{ Porción}} \approx \frac{98 \text{ mg}}{1 \text{ Porción}}$$

$$\text{Energía} = \sum \text{Calores (Proteína + Lípidos + Carbohidratos + Fibra total)}$$

$$\text{Energía} = \frac{10 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{4 \text{ Kcal}}{\text{g}} + \frac{0,35 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{9 \text{ Kcal}}{\text{g}} + \frac{26,5 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{4 \text{ Kcal}}{\text{g}} + \frac{0,45 \text{ g}}{1 \text{ Porción}} \times \frac{2 \text{ Kcal}}{\text{g}}$$

$$\text{Energía} = 150 \text{ Kcal}$$