



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
LICENCIATURA EN QUÍMICA DE ALIMENTOS

TESIS

**PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL JARABE DE AGUAMIEL:
INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PROCESAMIENTO EN LA
ESTANDARIZACIÓN DEL PRODUCTO**

Para obtener el título de
Licenciado en Química de Alimentos

PRESENTA

Rodríguez Márquez Alejandro

Directora

Dra. Elizabeth Contreras López

Codirectora

Dra. Laura García Curiel

Mineral de la Reforma, Hidalgo, diciembre, 2025



Mineral de la Reforma, Hgo., a 12 de diciembre de 2025

Número de control: ICBI-D/3168/2025

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Química en Alimentos **Alejandro Rodríguez Márquez**, quien presenta el trabajo de titulación "**Parámetros fisicoquímicos del jarabe de aguamiel: influencia de la temperatura de procesamiento en la estandarización del producto**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Judith Jaimez Ordaz

Secretario: Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores

Vocal: Dra. Elizabeth Contreras López

Suplente: Dra. Laura García Curiel

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

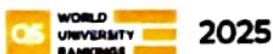
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

Para mi madre, Magdalena Márquez: mi guía, mi refugio y mi mayor ejemplo de vida. Gracias por creer en mí incluso antes de que yo lo hiciera. Tu apoyo es el cimiento sobre el cual he construido este logro, y a ti te lo entrego con todo mi amor y gratitud.

A mi abuela Domitila Ramírez, a mi hermana Itzel Rodríguez, mi sobrina Katherine Cornejo, mi ahijada Andrea Márquez y todos los miembros de mi familia que están conmigo.

Por aquellos que ya no se encuentran en este plano material, a mi padre Cenorino Rodríguez, a mi Abuelo Bernardo Márquez y mi padrino Domingo.

A la Dra. Elizabeth Contreras Lopez porque sin ella, yo no estaría en esta etapa final, por apoyarme y guiarme en toda mi carrera.

A la coordinadora la Dra. Araceli Castañeda Ovando por aconsejarme y resolver mis dudas. Al Dr. Jesús Guadalupe Pérez Flores por resolver mis dudas y ser un gran apoyo en la elaboración de esta tesis.

A la Dra. Judith Jaimez Jordaz por enseñarme mucho de gramática y aspectos sensoriales.

A la Dra. Laura García Curiel por notificarme los puntos a mejorar en este proyecto de investigación.

Al Dr. Guillermo González Olivares por sugerirme ideas y enseñarme mucho sobre lácteos.

Al Dr. Javier Añorve Morga por asesorarme y apoyarme en mi carrera.

A mis amigos que estuvieron desde el inicio de la carrera: Daniela Rocha, Alonso Sánchez, Daniel Pérez, Yeimi Hernández, Luis Mendoza y Yostinc Bautista por los mejores ratos de la universidad.

A los amigos que formé en el transcurso de mi carrera: Valeria Berty, Vianney Nuñez, Emma Fuentes, Iván Santana, Fer Vargas, Jezabel Contreras, Fatima Morales, Shirel Ramos, Delia, Angeles, Nagtlllely, Ailin.

A quienes conocí en UCL: A mi amigo Alexis, a mi amiga Jaqueline, a mi amigo Alfonso, Alberto. Al personal de UCL Daniel, Erik, Carlos, Alberto, Edgar, Mario, Zita.

Por aquellas personas que me han apoyado y me motivan a ser una mejor persona cada día, a mi tío Esteban Márquez, a José Luis Cruz y a Diana Moreno.

A todos los miembros de la familia Rodríguez que han velado por mi bienestar y seguridad: Daniela, María Luisa, María Jesús, y Margarita Inés.

A todos los miembros de mi familia materna, quienes me han visto crecer, me han cuidado y me hacen pasar los mejores momentos de mi vida: Andrés López, Herminia Márquez, Hidekel López, Karen Márquez, Alma Angeles y Bernardo Márquez, Channel Márquez, Ana Luisa Cruz, Jesús Márquez, Jonathan Márquez, Jesús Márquez Jr. Leah Márquez, Larah Márquez.

A todos mis compañeros que me recibieron en R.D. MAR pero especialmente a Valeria Cadena, Andrés Dueñas, Leslie Gutiérrez, Cristy Gutiérrez, Mónica Gutiérrez y Manuel Rivero. Personas que me dieron la oportunidad de apoyar y desenvolverme.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a las instituciones y personas que brindaron el apoyo necesario para la culminación de este trabajo de investigación:

- A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, mi casa de estudios, por abrirme las puertas y brindarme las herramientas académicas para mi formación como Licenciado en Química de Alimentos.

- A Planta Piloto y su personal, por facilitarme las instalaciones y equipos necesarios para llevar a cabo la fase experimental de este proyecto. Mi reconocimiento al personal técnico por su disposición y apoyo en el manejo de los equipos de procesamiento térmico.

- A mi Directora de Tesis, la Dra. Elizabeth Contreras Lopez, por su visión, paciencia y por guiarme con su experiencia científica en cada etapa de este análisis. Gracias por confiar en mi capacidad y por las horas dedicadas a la revisión de este documento.

- A la comunidad de San Gabriel Azteca, en Zempoala, especialmente a los productores de maguey, por suministrar la materia prima esencial para este estudio. Gracias por compartir su conocimiento y por permitir que la ciencia y la tradición del aguamiel se unan en este trabajo.

- A mi Coordinadora de la Licenciatura en Química de Alimentos, la Dra. Araceli Castañeda Ovando, por su gestión, acompañamiento y por facilitar los procesos administrativos y académicos que permitieron el desarrollo fluido de mi trayectoria estudiantil.

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VI
Lista de acrónimos	VII
Abstract	VIII
Resumen	IX
Introducción	X
1. Antecedentes	1
1.1. El maguey	1
1.2. El aguamiel	2
1.3. Procesamiento térmico en jarabes y reacciones asociadas	4
1.3.1. Reacción de Maillard	4
1.3.2. Caramelización	4
1.3.3. Inversión de azúcares	5
1.3.4. Degradación térmica de compuestos bioactivos	5
1.3.5. Estandarización	5
1.3.6. Modelos cinéticos aplicados en alimentos líquidos y jarabes	6
1.4. Jarabe de aguamiel	6
1.4.1. Diferencia entre mieles y jarabes	9
1.4.2. Clasificación de jarabes naturales	9
1.5. Implicaciones en el proceso de elaboración del jarabe de aguamiel	9
1.5.1. Operaciones unitarias	9
1.5.2. Estandarización y normatividad de edulcorantes naturales	10
2. Planteamiento del problema	11
3. Justificación	12
4. Hipótesis	13

5. Objetivos	14
5.1. Objetivo general	14
5.2. Objetivos Específicos	14
6. Materiales y métodos	15
6.1. Materia prima	15
6.2. Descripción del estudio	15
6.3. Determinación de propiedades fisicoquímicas	16
6.3.1. Sólidos solubles (°Brix)	16
6.3.2. pH	16
6.3.3. Acidez titulable total	16
6.3.4. Espacio de color	17
6.4. Rendimiento	17
6.5. Determinación de azúcares por HPLC	18
6.6. Modelado cinético de parámetros fisicoquímicos	19
6.7. Modelado predictivo de °Brix a partir de parámetros de color	20
7. Resultados y discusión	22
7.1. Determinación de propiedades fisicoquímicas	22
7.1.1. Sólidos solubles (°Brix)	22
7.1.2. pH	23
7.1.3. Acidez titulable total	24
7.1.4. Espacio de color	25
7.2. Efecto de los tratamientos térmicos en el rendimiento	29
7.3. Determinación de azúcares	30
7.4. Modelado cinético de parámetros fisicoquímicos	32
7.5. Modelado predictivo de °Brix a partir de parámetros de color	32
8. Conclusiones y perspectivas	40
A. Anexos	41
A.1. Modelado cinético de los atributos de calidad del aguamiel	41
Referencias	46

Índice de figuras

1.1. Comparación de los métodos tradicional e industrial para la elaboración de jarabe de aguamiel.	7
7.1. Evolución de los sólidos solubles (°Brix) durante el procesamiento térmico.	23
7.2. Variación del pH bajo diferentes tratamientos térmicos.	24
7.3. Cinética de variación de la acidez titulable total (ATT) del aguamiel durante el procesamiento térmico.	25
7.4. Modelado cinético del valor L^* durante el procesamiento térmico de aguamiel	26
7.5. Modelado cinético del valor a^* durante el procesamiento térmico de aguamiel	28
7.6. Modelado cinético del valor b^* durante el procesamiento térmico de aguamiel	29
7.7. Perfil de azúcares y rendimiento bajo diferentes tratamientos térmicos	31
7.8. Predicción de °Brix mediante mínimos cuadrados parciales (PLS) con tres componentes latentes (validación cruzada por serie)	34
7.9. Predicción de °Brix con PLS bajo condición térmica de 90 °C	35
7.10. Predicción de °Brix con PLS bajo condición térmica de 100 °C	36
7.11. Predicción de °Brix con PLS bajo condición de rampa térmica (100-90 °C).	37
7.12. Predicción de °Brix mediante regresión lineal múltiple (validación cruzada por serie)	38

Índice de tablas

1.1. Características morfológicas y ecológicas de diversas especies y subespecies de agave	2
1.2. Composición química de aguamiel de <i>A. atrovirens</i> y <i>A. salmiana</i> (base húmeda)	3
1.3. Parametros fisicoquímicos del jarabe de aguamiel	8
1.4. Operaciones unitarias para el jarabe de aguamiel	9
7.1. Rendimiento del jarabe de aguamiel bajo distintos tratamientos térmicos	30
7.2. Contenido de azúcares (g/100 g de jarabe) determinados por HPLC en jarabes de aguamiel obtenidos bajo diferentes condiciones de procesamiento térmico (media \pm desviación estándar)	31
7.3. Comparación del desempeño de los modelos predictivos de °Brix a partir de parámetros de color CIE-Lab (L^* , a^* , b^*).	32
A.1. Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados a los sólidos solubles del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.	41
A.2. Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al pH del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.	42
A.3. Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados a la acidez titulable total (ATT) del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.	43
A.4. Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al valor L^* del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.	43
A.5. Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al valor a^* del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.	44
A.6. Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al valor b^* del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.	45

Lista de acrónimos

ATT	acidez titulable total	32
FAO	Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas	5
FOS	Fructooligosacáridos	3
HMF	5-hidroximetilfurfural	4
HPLC	cromatografía líquida de alta resolución	32
PLS	mínimos cuadrados parciales	32

Abstract

THE STANDARDIZATION of aguamiel syrup production was addressed to overcome the natural variability of the raw material and the lack of defined protocols, aiming to obtain a product with homogeneous and reproducible physicochemical properties. The objective was to establish controlled thermal conditions of time and temperature to characterize, analyze, and model changes in soluble solids, pH, titratable acidity, and color, in order to propose processing parameters that ensure stability and quality. Fresh aguamiel collected in Hidalgo, Mexico, was characterized and subjected to three heating conditions: isothermal at 90 °C, isothermal at 100 °C, and a descending ramp from 100 to 90 °C, in six independent series. Hourly measurements of °Brix, pH, acidity, and color were performed, together with sugar profile analysis by HPLC, and the data were fitted to zero-, first-, and second-order kinetic models. The results showed that the average yield of the syrup was $11.9 \pm 2.9\%$, with the highest values under ramp treatment (up to 15.5%), while isothermal processing at 100 °C resulted in lower recovery. Sugar profiling revealed that lower temperatures and ramp protocols favored partial hydrolysis of sucrose and preservation of fructans and reducing sugars, whereas the 100 °C condition retained more sucrose but led to lower levels of functional compounds. Kinetic modeling adequately described the observed changes, with °Brix fitting second-order equations, pH following first-order models, and acidity and color aligning with zero- or first-order models depending on the thermal condition. Overall, controlled thermal profiles improved reproducibility, compositional stability, and syrup quality, supporting the proposal to standardize processing conditions. This approach provides a framework for the technological optimization of aguamiel syrup as a functional sweetener. It offers application prospects for small-scale producers to develop a new variety of subproduct derived from aguamiel, achieving energy efficiency and the preservation of bioactive compounds through sustainable, high-value-added processes.

Resumen

LA ESTANDARIZACIÓN del proceso de producción de jarabe de aguamiel responde a la necesidad de obtener un producto con propiedades fisicoquímicas homogéneas y reproducibles, dada la variabilidad natural del aguamiel y la falta de protocolos definidos. El objetivo fue establecer condiciones térmicas controladas de tiempo y temperatura para caracterizar, analizar y modelar los cambios en sólidos solubles, pH, acidez titulable total y color, con el fin de proponer parámetros de procesamiento que garanticen estabilidad y calidad. El aguamiel fresco recolectado en Hidalgo fue caracterizado y sometido a tres condiciones de calentamiento: isotermas a 90 °C, isotermas a 100 °C y rampa descendente de 100 a 90 °C, en seis series independientes. Se realizaron mediciones horarias de °Brix, pH, acidez y color, además del análisis de azúcares por HPLC, y los datos se ajustaron a modelos cinéticos de orden cero, primero y segundo. Los resultados mostraron que el rendimiento promedio del jarabe fue de $11.9 \pm 2.9\%$, con valores más altos en el tratamiento en rampa (hasta 15.5%), mientras que los jarabes obtenidos a 100 °C presentaron menor recuperación. El perfil de azúcares indicó que temperaturas más bajas y rampas favorecieron la hidrólisis parcial de la sacarosa y la conservación de fructanos y azúcares reductores, mientras que el tratamiento a 100 °C preservó más sacarosa, aunque con menor contenido de compuestos funcionales. El modelado cinético describió adecuadamente los cambios, ajustándose los °Brix a ecuaciones de segundo orden, el pH a primer orden y la acidez y el color a modelos de orden cero o primer orden según la condición aplicada. En conjunto, se concluye que los perfiles térmicos controlados mejoraron la reproducibilidad, estabilidad composicional y calidad del jarabe, respaldando la propuesta de estandarizar las condiciones de procesamiento. Este enfoque ofrece una base para la optimización tecnológica del jarabe de aguamiel como edulcorante funcional, con perspectivas de aplicación en pequeños productores para obtener una nueva variedad de subproducto obtenido del aguamiel, lograr eficiencia energética, preservación de compuestos bioactivos orientados hacia procesos sostenibles y de mayor valor agregado.

Introducción

EL MAGUEY (*Agave salmiana*) es una planta de gran relevancia histórica, cultural y económica en México, utilizada desde la época prehispánica para la producción de pulque y otros derivados de alto valor social y alimentario. Entre sus subproductos se encuentra el aguamiel, savia azucarada de características fisicoquímicas variables que constituye la materia prima para la elaboración de bebidas y edulcorantes. En años recientes, el jarabe de aguamiel ha cobrado interés por sus propiedades nutraceuticas, su potencial como edulcorante natural y su aporte de compuestos funcionales como fructanos y saponinas, lo que lo convierte en una alternativa frente a la sacarosa y otros azúcares refinados para ser un producto funcional.

A pesar de este potencial, la producción de jarabe de aguamiel enfrenta limitaciones relevantes. La variabilidad intrínseca del aguamiel, influida por factores genéticos, ambientales y de manejo agrícola, condiciona la composición inicial de sólidos solubles, azúcares, pH y acidez, lo que impacta directamente en la calidad y estabilidad del producto final. A ello se suma que los métodos de concentración comúnmente utilizados se fundamentan en prácticas tradicionales sin control estandarizado de tiempo y temperatura, dificultando la obtención de un jarabe con propiedades constantes y reproducibles. Esta falta de uniformidad restringe su competitividad frente a otros edulcorantes que, gracias a procesos tecnológicos más estables y eficientes, han alcanzado una posición consolidada en el mercado global.

En el ámbito científico, los estudios sobre el jarabe de aguamiel han documentado tanto su composición química como sus beneficios potenciales, pero aún persiste la necesidad de generar conocimiento orientado a la estandarización de su producción. En particular, existen discrepancias en relación con el efecto de los perfiles térmicos sobre la preservación de compuestos funcionales, el rendimiento del proceso y la calidad sensorial. Algunos trabajos señalan que el uso de temperaturas elevadas favorece la conservación parcial de la sacarosa, mientras que otros concluyen que tratamientos más suaves o escalonados permiten conservar azúcares reductores y compuestos bioactivos. Esta divergencia refleja una controversia aún abierta en el campo y pone de manifiesto la importancia de evaluar comparativamente distintas condiciones de procesamiento para identificar parámetros óptimos que puedan replicarse en contextos productivos.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo estandarizar las condiciones físicas de producción de jarabe de aguamiel mediante el control de las variables de tiempo y temperatura, con el propósito de obtener un producto homogéneo y estable en sus propiedades fisicoquímicas. Para ello, se caracterizó la materia prima y se sometió a tratamientos isotérmicos y en rampa, evaluando el efecto de cada condición sobre el rendimiento, el perfil de azúcares, el pH, la acidez titulable y el color. Asimismo, se implementó un modelado cinético de los cambios registrados, con el fin de describir cuantitativamente las transformaciones y establecer bases científicas que sustenten la propuesta de condiciones estandarizadas. Este estudio busca contribuir al desarrollo tecnológico de un edulcorante con potencial funcional y valor agregado para la agroindustria mexicana, fortaleciendo así su competitividad en mercados de alimentos que demandan productos funcionales y sostenibles.

1.1. El maguey

LOS MAGUEYES son plantas clasificadas en el género *Agave*, este se diversifica en varias especies, entre esta el *Agave salmiana*, que es una subespecie originaria de México y a la que se le conoce coloquialmente como maguey. El maguey produce un subproducto conocido como agua miel o savia de agave, el cual es incoloro y de sabor dulce (Huezcas-Garrido et al., 2022).

Se ha registrado el uso del maguey desde tiempos prehispánicos, especialmente en el centro de México donde se establecieron culturas como la teotihuacana, tolteca y mexicana. Desde esa época era utilizado para producir pulque, el cual era considerado como una bebida sagrada en ceremonial y rituales de carácter religioso. Adicionalmente, se aprovechaba para la fabricación de textiles (Sánchez Jiménez, 2025).

Su importancia biocultural refuerza la necesidad de preservar tanto el maguey como las prácticas involucran su aprovechamiento (Sánchez Jiménez, 2025). Hoy en día, se han adoptado perspectivas innovadoras para el uso de sus subproductos, tal como el uso de jarabe de aguamiel como edulcorante en bebidas. Además, se han valorado sus subproductos por sus efectos beneficiosos a la salud debido a la presencia de compuestos bioactivos que contribuyen a la salud de la microbiota intestinal, contribuyendo en las investigaciones sobre el tratamiento de úlceras y cáncer de colon (Huezcas-Garrido et al., 2022).

En México existen al menos 119 especies endémicas de *Agave*, de las cuales 30 se reporten como magueyes productores de pulque, de los cuales también se puede obtener subproductos como el aguamiel (Márquez-Pallares et al., 2024).

La distribución del agave, así como su importancia económica y social se resalta en las regiones del centro y norte del país, su presencia se ha registrado en estado como Hidalgo, Tlaxcala, México, Puebla y Veracruz, Zacatecas, además de zonas como el altiplano potosino. En general, la planta de maguey se adapta bien en condiciones de baja precipitación, heladas frecuentes y suelos pocos fértiles, haciéndolo ideal para su crecimiento en las zonas áridas del país (Narváez Suárez et al., 2016).

El cultivo de maguey se aprecia debido a que es eficiente para la conservación y formación del suelo agrícola, además por la forma de cultivo en hileras y la retención de la misma planta, representa una ventaja para el aprovechamiento de agua durante el riego del cultivo, adicionalmente, representa un elemento importante para la conservación de la biodiversidad al ser huésped de distintos animales e insectos (Narváez Suárez et al., 2016).

Según estadísticas del SIAP, en 2022 se registró al estado de Hidalgo como el primer lugar en el cultivo de agave pulquero, reportando 4814.7 hectáreas. Además de resaltar que los cultivos seguían sistemas tradicionales (Figueredo-Urbina et al., 2024).

En la región de la Altiplanicie pulquera en Hidalgo, se ha registrado que el principal cultivo es el maguey manso, seguido por variedades como el Xamini y Chalqueño. En cuanto a la variedad, se ha demostrado que existe disminución en el inventario disponible, esto combinado con el bajo financiamiento y esfuerzos fallidos, han llevado a los productores a considerar que la planta puede estar en peligro de extinción (Suárez, 2023).

A nivel taxonómico es una especie que aún no se define totalmente, ya que suele presentar gran variedad morfológica e hibridación en condiciones no controladas. En general se pueden distinguir por gran número de hojas rígidas con margen recto a ondulado y espinado de color verde brillante a gris-azulado, las inflorescencias se caracterizan por ser altas y robustas, llegando a medir desde 1.8 m hasta 12 m de longitud. Sus flores abren desde la base del ápice y obtenemos lo que conocemos como gualumbos. Su semilla es indivisible, por lo que son plantas monocotiledóneas y además hermafroditas. Estas plantas llegan a medir hasta 3 metros de altura y pueden vivir entre 5 y 70 años según su especie (Chávez-Güitrón et al., 2019).

En México se ha registrado la presencia de un gran número de agaves pulqueros. Existen alrededor de 160 especies de las cuales 40 son empleadas para la obtención de aguamiel y, por ende, la elaboración de pulque. Los magueyes más utilizados se presentan en la Tabla 1.1 a continuación (Álvarez-Ríos et al., 2022). Las especies y subespecies de *Agave* muestran una amplia variabilidad morfológica y adaptativa que refleja tanto su distribución geográfica como su aprovechamiento cultural y económico. *A. mapisaga* se distingue por ser la de mayor altura (4.5 m) y por su gran cantidad de espinas laterales, mientras que *A. marmorata* y *A. salmiana* subsp. *crassispina* son más pequeñas (1.5 m), adaptadas a zonas áridas con hojas gruesas que favorecen la retención de agua. En términos de uso, *A. salmiana* (tanto subsp. *crassispina* como subsp. *salmiana*) destaca por su relevancia en la producción de aguamiel y pulque, mientras que el resto tienen usos ornamentales, forrajeros o potencial en fibras, lo que resalta la diversidad funcional de este género dentro de los sistemas productivos y culturales de México.

Tabla 1.1: Características morfológicas y ecológicas de diversas especies y subespecies de agave

Especie / Subespecie	Nombres comunes	Altura (m)	Distribución / Hábitat	Usos principales
<i>Agave americana</i> subsp. <i>americana</i>	Maguey cenizo, maguey blanco	2.0	Regiones diversas de México	Ornamental, aprovechamiento local
<i>Agave atrovirens</i>	Cumbre, tepemeti	2.5	Sierra Madre Oriental, templado	Ornamental, potencial para pulque
<i>Agave hookeri</i>	Manso, blanco	2.0	Eje Neovolcánico, climas templados	Ornamental, uso local
<i>Agave mapisaga</i>	Mano larga, listoncillo	4.5	Cultivado en México	Ornamental, forrajero, fibras
<i>Agave marmorata</i>	-	1.5	Zonas áridas de Puebla y Oaxaca	Ornamental, uso local
<i>Agave salmiana</i> subsp. <i>crassispina</i>	-	1.5	Centro-norte árido de México	Aguamiel y pulque
<i>Agave salmiana</i> subsp. <i>salmiana</i>	Verde, chalqueño, manso	3.0–4.0	Amplia en México	Aguamiel, pulque, ornamental

1.2. El aguamiel

La savia del maguey es conocida como aguamiel, la cual, entre otras cosas, sirve para la producción de pulque, una bebida alcohólica tradicional de México (Castañeda-Ovando et al., 2023). El aguamiel es ligeramente dulce, viscoso y efervescente, usualmente se consume como una bebida fresca con notas vegetales. Además, se reconoce su aporte nutricional al contener compuestos bioactivos que benefician a efectos antioxidantes (Noriega-Juárez et al., 2025). Algunas normas como la NMX-FF-110-SCFI-2008 definen al jarabe de aguamiel, como la sustancia dulce natural producida por hidrólisis a partir de los oligosacáridos del agave, especificando que su color debe ser propio característico variable de: cristalino agua, extra a cristalino, cristalino, extraclaro, ámbar, ámbar claro, ambas y oscuro, el olor se describe como propio característico, el sabor dulce y la consistencia ligeramente viscosa (Secretaría de Economía, 2008).

La fermentación de aguamiel, derivada de la gran cantidad de azúcares fermentables y microorganismos presentes en el aguamiel es lo que hace posible la producción del pulque. Además, la presencia de estos componentes otorga al aguamiel y sus subproductos efecto probióticos y prebióticos (Morales et al., 2024).

Un punto a resaltar es que dependiendo de la variedad de agave, así como las condiciones de cultivo, sus propiedades nutricionales pueden variar, en la Tabla 1.2 se reportan algunos valores de dos variedades diferentes (Romero-López et al., 2015; Zúñiga Escobar & Niederle, 2017). La composición de aguamiel muestra variaciones marcadas entre especies. *A. salmiana* presenta menor humedad y mayor contenido de materia seca que *A. atrovirens*, lo que podría influir en su concentración de sólidos disueltos y potencial de fermentación. En contraste, *A. atrovirens* destaca por su mayor proporción de azúcares simples (fructosa, glucosa y sacarosa) y compuestos funcionales como fructooligosacáridos y saponinas, que no fueron reportados para *A. salmiana*. Estas diferencias pueden estar asociadas a la fisiología de cada especie, condiciones de cultivo y madurez al momento de la recolección.

Tabla 1.2: Composición química de aguamiel de *A. atrovirens* y *A. salmiana* (base húmeda)

Componente	<i>A. atrovirens</i> (% base seca)	<i>A. salmiana</i> (%)
Humedad	89.61 ± 0.02	84 - 85
Materia seca	-	15.5
Proteína / Proteína cruda	3.50 ± 0.11	0.69
Extracto etéreo	-	0.27
Fibra cruda	-	0.57
Cenizas	3.10 ± 0.23	0.39
Fructosa total	32.63 ± 0.06	-
Glucosa total	28.68 ± 0.02	-
Fructooligosacáridos	15.51 ± 0.04	-
Sacarosa	12.90 ± 0.06	-
Saponinas	1.17 ± 0.10	-
pH	6.29 ± 0.02	-
Acidez titulable	0.06 ± 0.02	-
Sólidos solubles (°Brix)	11.10 ± 0.10	-
Extracto libre de nitrógeno	-	98.08

Además de ser una bebida, se ha considerado al aguamiel como un ingrediente valioso, usualmente empleado como edulcorante, ya que en su composición se encuentran compuestos como los Fructooligosacáridos (FOS) como la inulina, a la que se la han atribuido beneficios a la salud, entre otras cosas, por tener la mitad de calorías por gramo en comparación a la sacarosa o la glucosa mientras mantiene un poder edulcorante de 0.3 a 0.6, en combinación con otros edulcorantes no calóricos resulta como una alternativa ante la sacarosa, la cual es asociada a padecimientos como la diabetes, obesidad o enfermedades cardiovasculares (León Báez & Márquez Pallares, 2024).

Adicionalmente, el uso de edulcorantes como el jarabe de aguamiel ha surgido como una alternativa ante el mercado de confitería sin azúcar. De esta manera no solo se otorga dulzor a los productos de confitería sino que un aporte nutricional extra, y funcionalidad como prebióticos, logrando que puedan clasificarse como alimentos funcionales. Algunos estudios han incorporado el aguamiel junto con edulcorantes de bajo aporte calórico para la formulación de gomitas y caramelos macizos, logrando así un producto agradable y beneficioso para la salud (Cruz et al., 2021).

A pesar de la tendencia de su uso en distintas instancias, además de la bebida tradicional, diversos estudios mencionan que no existe información concreta sobre su rentabilidad económica. Los procesos de obtención del aguamiel también influyen en este aspecto pues pueden suponer una desventaja en relación con la velocidad en la que la demanda aumenta. Por ejemplo, los métodos de obtención tradicional consisten en cortar las hojas tiernas centrales antes del desarrollo del quiste o tallo central y posteriormente se realiza una cavidad en la región central de la planta que servirá para la recolección de aguamiel en un periodo de 3 a 6 meses, en la Figura 4 se presenta de manera gráfica el proceso de obtención en un panorama más completo. Dependiendo de la época del año se pueden recolectar de 3 a 6 litros por día, no obstante, un estudio FODA demuestra que la producción de aguamiel suele tener como debilidades la escasez de personal y el alto costo de transporte de los productos, además de amenazas como la baja producción semanal y ventas bajas (Avila-Lara et al., 2021).

Otros procesos que se están estudiando como la producción de agave mediante hidrólisis enzimática han mostrado resultados prometedores en cuanto al agrado sensorial además de la estabilidad del producto y proceso, eliminando subproductos no deseados. No obstante, es necesaria la investigación con mayor profundidad de estos métodos en el aspecto científico y sus implicaciones éticas, económicas y culturales (Vicente-Magueyal et al., 2020).

1.3. Procesamiento térmico en jarabes y reacciones asociadas

El procesamiento térmico de jarabes y productos ricos en azúcares, como mieles y jugos concentrados, tiene implicaciones directas en su calidad, seguridad y aceptación sensorial. Este tratamiento promueve reacciones químicas como la de Maillard y la zación, que generan compuestos de color y sabor, pero también derivados no deseables como el 5-hidroximetilfurfural (HMF). La formación de HMF es un indicador de degradación térmica y se utiliza como marcador de calidad y seguridad en productos azucarados (Toufeili et al., 2022). Su concentración aumenta con la aplicación de calor y depende de las condiciones de almacenamiento, lo que permite monitorear la integridad de mieles y jarabes (Shapla et al., 2018).

El perfil térmico aplicado, ya sea constante o escalonado, influye en la cinética de estas reacciones y en las características finales del producto. Temperaturas más elevadas y rampas de calentamiento intensifican tanto la caramelización como la reacción de Maillard, favoreciendo la generación de sabores complejos, pero también incrementando los niveles de HMF, lo que puede comprometer la calidad nutricional y sensorial (Aldana et al., 2023). Parámetros como la temperatura y el pH afectan de manera diferenciada la composición del jarabe, sugiriendo que es posible optimizar los perfiles térmicos para maximizar la formación de compuestos deseables y controlar los indeseables (Aldana et al., 2023).

La optimización del proceso térmico también presenta implicaciones en la eficiencia energética de la producción. Sistemas con integración térmica, como evaporadores de múltiple efecto con alimentación en contracorriente, permiten un uso más eficiente del calor, mejorando la sostenibilidad del procesamiento de jarabes sin descuidar los aspectos de calidad (Medina et al., 2024).

Desde el punto de vista sensorial, la aceptación del consumidor está vinculada al equilibrio entre los atributos de sabor y los indicadores de seguridad. La adición de compuestos como caramelo o melazas mejora la percepción sensorial, aunque también contribuye a una mayor formación de HMF (Sung et al., 2020). Esta relación destaca la necesidad de desarrollar perfiles de calentamiento específicos para nuevas formulaciones, que armonicen la calidad sensorial con estándares de seguridad.

1.3.1. Reacción de Maillard

Es una serie de reacciones no enzimáticas que se da en los azúcares reductores como la glucosa y fructosa, así como los aminoácidos presentes en el aguamiel (lisina, fenilalanina y serina). Dependiendo de la especie del agave, la concentración de proteínas puede variar, pero al ser calentados, estos grupos amino reaccionan con los azúcares dando como producto las melanoidinas, estos son compuestos poliméricos de color marrón característico de la reacción de Maillard (Cerón Zamora, 2022)

Las melanoidinas formadas no sólo dan color, sino que aumentan la viscosidad del jarabe.. También, esta reacción es más rápida a comparación de otros jarabes debido a su alto contenido de nitrógeno orgánico. Esto explica el cambio de color tan notorio a 90°C (C. I. Pereira et al., 2008).

Dentro de la reacción de Maillard ocurre una sub-reacción llamada degradación de strecker, este proceso se da cuando los intermediarios dicarbonílicos de Maillard reaccionan con aminoácidos específicos del agave como la valina o leucina, lo que produce aldehídos que otorgan el olor a tostado característico del jarabe de aguamiel (W. Li et al., 2021).

1.3.2. Caramelización

Es la oxidación y degradación térmica de los carbohidratos, esto se da a temperaturas elevadas arrojando compuestos volátiles y polímeros de color, asociados generalmente al aroma a caramelo y color café (Provost et al., 2016).

Esta reacción, ocurre sin la necesidad de las proteínas y genera compuestos volátiles que dan el aroma que conocemos como “caramelo” o “tostado”. Aún así ocurre de manera simultánea con la reacción de Maillard cuando el jarabe alcanza puntos críticos de concentración (Justo et al., 2001).

Tanto en la reacción de Maillard como en la caramelización, se obtiene el hidroximetil furfural (HMF) siendo un indicador de exceso de temperatura y tiempo. Altos niveles de este compuesto se ven reflejados en parámetros de color, especialmente en a^* (rojo) y la pérdida de b^* (luminosidad) (Coutiño-Estrada et al., 2010).

1.3.3. Inversión de azúcares

Consta de la ruptura de la sacarosa en glucosa y fructosa. Este rompimiento es acelerado por la combinación del calor y el pH ligeramente ácido de la savia. La fructosa generada es mucho más dulce y es más afín para el pardeamiento que la sacarosa. A 70°C el contenido es mucho mayor, pero si se aumenta la temperatura, la hidrólisis al ser más severa, aumenta los azúcares reductores (Cerón Zamora, 2022).

La hidrólisis ácida-térmica es el mecanismo principal, por lo que si el pH llega a bajar, la velocidad de la inversión de la sacarosa aumentará exponencialmente. Esto incrementa el número de azúcares reductores necesarios para la reacción de Maillard (Klumpers et al., 2022).

1.3.4. Degradación térmica de compuestos bioactivos

Las saponinas, otro grupo de compuestos bioactivos del aguamiel, también se ven afectadas por el calor. Su concentración y bioactividad varían según la madurez de la planta (Leal-Díaz et al., 2015), y el tratamiento térmico puede comprometer sus propiedades beneficiosas, lo que hace necesario regular las condiciones de procesamiento para conservar sus efectos farmacológicos (Santos-Zea et al., 2016).

La temperatura y el tiempo de exposición durante el tratamiento térmico influyen en la distribución de los pesos moleculares de los fructanos, lo cual afecta directamente su eficacia prebiótica (Plascencia et al., 2022).

Los compuestos funcionales presentes en el aguamiel y otros productos derivados del agave, como los fructanos, la inulina y las saponinas, poseen propiedades prebióticas y nutraceuticas cuya estabilidad durante el procesamiento térmico determina su valor nutricional final. El jarabe de aguamiel, empleado como edulcorante natural, contiene estos componentes como elementos principales. Los tratamientos térmicos modifican la composición de azúcares en el jarabe, reduciendo específicamente la concentración de kestosa y fructanos de alto peso molecular como consecuencia de su hidrólisis, lo que genera un aumento en monosacáridos y disacáridos libres (Muñiz-Márquez et al., 2015). Este proceso de degradación disminuye la calidad nutricional del producto.

1.3.5. Estandarización

Hoy en día gran parte de la industria se caracteriza por la producción rápida y en abundancia de alimentos, los cuales suelen tener estándares altos de calidad debido a los estándares impuestos, esto resulta cierto para la mayoría de alimentos que no se consideran inusuales, tradicionales o exóticos. Sin embargo, existen ciertos grupos en los que existe una falta de estandarización de métodos que permitan caracterizar sus propiedades, dificultando la regularización de los productos (Grossmann et al., 2021).

Organismos como la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) definen los objetivos de la estandarización como lograr que todos los productores se adhieran a los mismos estándares de producción y calidad, facilitando procesos logísticos, de intercambio y previniendo el engaño al consumidor y mejora de la calidad. Los estándares deben de ser acordados de acuerdo a consideraciones técnicas u otros criterios precisos que indiquen que es adecuado para el proceso y producto (Dankers, 2003).

La estandarización influye en gran manera en la industria alimentaria, afecta los métodos de producción y los hábitos de consumo de la población debido a patrones que generalmente son promovidos por corporaciones multinacionales, quienes además de difundir pautas estandarizadas de producción en serie, también promocionan marcas comerciales registradas y que todo el mundo puede identificar. Además, generan reglas

que determinen la entrada o denegar el acceso a productos debido a los estándares de calidad si es que estos no se cumplan (Zúñiga Escobar & Niederle, 2017).

1.3.6. Modelos cinéticos aplicados en alimentos líquidos y jarabes

La aplicación de modelos cinéticos, específicamente de orden cero, primer orden y segundo orden, permite comprender las transformaciones fisicoquímicas en alimentos líquidos, lo cual es fundamental para predecir la estabilidad y calidad del producto durante el procesamiento y almacenamiento. En matrices como mieles, jugos, néctares y jarabes vegetales, estos modelos contribuyen a elucidar cambios en parámetros como °Brix, pH, acidez titulable y color (Porto et al., 2018).

Las propiedades fisicoquímicas de los jugos, como solubilidad, acidez y contenido de azúcares, varían en función de las técnicas de procesamiento empleadas. En jugos mixtos de remolacha y naranja, se han registrado valores de pH entre 3.98 y 4.25, acidez titulable de 0.42–0.56 % en ácido cítrico y °Brix entre 8.72 y 9.28 (Porto et al., 2018). La cinética de primer orden resulta particularmente útil para modelar la evolución de estos atributos a lo largo del tiempo.

Métodos de procesamiento térmico y no térmico, como los pulsos eléctricos y la homogenización a ultra alta presión, afectan de manera considerable dichas propiedades, haciendo necesario el uso de modelos cinéticos para su descripción precisa. Para los jarabes, el calor provoca la despolimerización tanto de agavinas como de inulina en azúcares reductores, que posteriormente se degradan en furanos. Aquí el modelo cinético se describe como una reacción consecutiva donde k_1 es la velocidad de hidrólisis de fructanos a azúcares y k_2 es la velocidad de degradación de esos azúcares a HMF (García-Soto et al., 2011).

De forma análoga, los cambios en acidez titulable y pH durante la pasteurización del jugo de caña de azúcar también se ajustaron a este tipo de modelos, facilitando el control de las condiciones de procesamiento (Gomes et al., 2020).

Las transformaciones de color y acidez titulable han sido ampliamente estudiadas en jugos de frutas. La cinética de cambio de color durante el almacenamiento puede predecirse mediante modelos de orden cero o de primer orden, lo que resulta de utilidad para estimar la vida útil y la calidad sensorial del producto (Gabrić et al., 2018). Esto también aplica para jarabes, lo cual incrementa significativamente con el tiempo.

Propiedades como la acidez titulable, el pH y los °Brix influyen en la aceptabilidad del consumidor y en la estabilidad del producto. La acidez titulable constituye un indicador más confiable de la calidad percibida en jugos de frutas que el pH por sí solo, existiendo una correlación directa entre estas propiedades y las preferencias de los consumidores (Bett-Garber et al., 2015; Detudom et al., 2023). Hay que considerar también las condiciones de almacenamiento, en el caso de los jarabes de sacarosa se observa una disminución del pH, lo cual acelera la inversión de sacarosa dando como resultado el aumento de la viscosidad y dulzor del jarabe en función del tiempo (Farrokhi et al., 2012).

1.4. Jarabe de aguamiel

El jarabe o miel de aguamiel es el producto que se obtiene tras someter al aguamiel como materia prima a un proceso largo de cocción hasta reducirlo lo suficiente obteniendo un producto dulce que se puede usar como edulcorante natural (Franco Malvaíz et al., 2014). Se han reportado valores de 70–75°Brix, 20–58 % de sacarosa, 5–23 % de fructosa, 4–18 % de glucosa, 4–10 % de fructanos y 3–4 % de proteínas en jarabe de aguamiel (Castañeda-Ovando et al., 2023).

Además, similar al aguamiel, tiene beneficios a la salud por sus propiedades nutraceuticas. En su composición contiene saponinas a las cuales se les ha atribuido propiedades anticancerígenas, inmunoestimulantes, antiinflamatorias y antioxidantes. Contienen también oligosacáridos, reconocidos por su actividad prebiótica. Se ha reportado que su contenido de vitamina C es similar a la de los líquidos cítricos, por lo cual, es importante que en el proceso de cocción se tengan en cuenta dichos compuestos para conservarlos (Castañeda-Ovando et al., 2023).

Otros procesos de obtención más refinados involucran la hidrólisis térmica del aguamiel, en el que ajustan valores como el pH o la temperatura para acelerar el proceso. Hay algunos más sofisticados que involucran

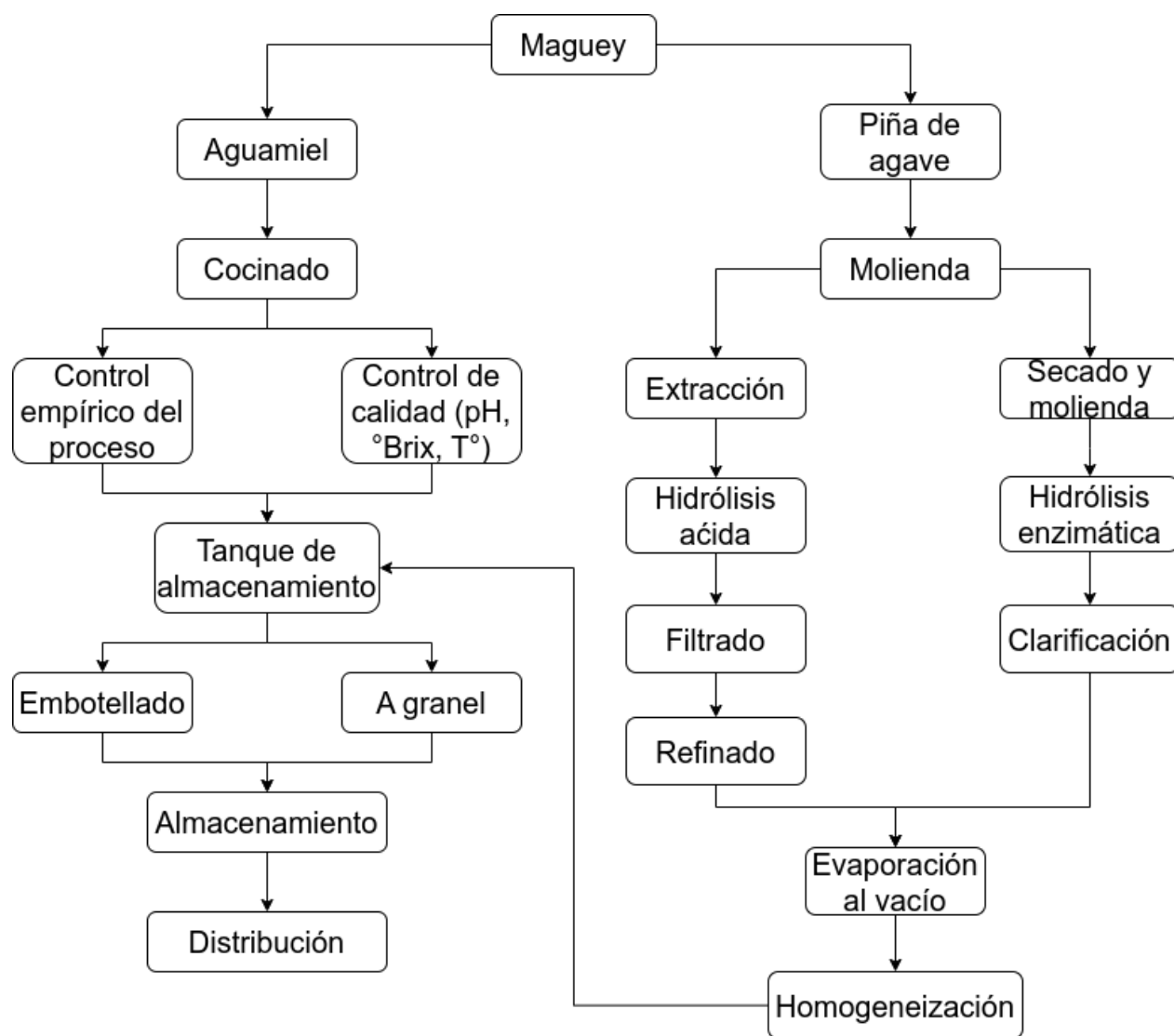


Figura 1.1: Comparación de los métodos tradicional e industrial para la elaboración de jarabe de aguamiel.

el uso directo de la piña del agave la cual se procesa bajo variables controladas para eliminar e hidrolizar los carbohidratos, esto con ayuda de métodos enzimáticos y ácidos.

El método consiste en la molienda de las piñas y la extracción del jugo, que se somete a hidrólisis enzimática o ácida a temperaturas de 80°C, aquí las inulinas y β -fructosidasas (enzimas glicosídicas) facilitan la hidrólisis de los fructanos para producir principalmente fructosa. Como etapa final, evaporación es realizada a temperaturas entre 95-100°C para obtener el jarabe de aguamiel. El método enzimático ha sido de gran ayuda para estandarizar y aumentar la producción del producto sin poner en riesgo la calidad del mismo (Ozuna & Franco-Robles, 2022; Yargatti & Muley, 2022). En la siguiente imagen (figura 7) se presenta un diagrama que muestra el proceso de manufactura del jarabe de aguamiel entre el método tradicional e industrial.

No obstante, debido a la poca consistencia de los métodos de producción así como las especificaciones de los ingredientes o condiciones en los mismos, no se ha logrado estandarizar la producción del jarabe de aguamiel (Yargatti & Muley, 2022).

Regulaciones en México como la NOM-003-SAGARPA-2016, ha buscado la regularización de dichas condiciones, no obstante se menciona en la misma norma que los métodos no están del todo estandarizados. A

pesar de esto la norma establece valores fisicoquímicos a tomar en cuenta como parámetros de calidad, como se observa en la Tabla 1.3 (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2016).

Tabla 1.3: Parametros fisicoquímicos del jarabe de aguamiel

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Expresado en unidades
Humedad	20	28	(g/100g)
pH	4.0	6.0	unidades de pH
Cenizas	-	0.60	(g/100g)
Sacarosa/difructosa	0.015	1.00	(g/100g)
Glucosa	3.00	12.0	(g/100g)
Fructosa	60	75	(g/100g)
Fructanos del agave	* valor positivo	5	(g/100g)
Manitol	0.005	1	(g/100g)
Otros Azúcares propios del Agave	-	0.1	%
Carbohidratos (incluyendo azúcares) no propios del agave	No se permite	No se permite	%
Hidroximetil Furfural	-	0.7	(g/100g)

Tabla obtenida de (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2016).

El jarabe de aguamiel debe cumplir con límites microbiológicos estrictos para garantizar su inocuidad. La cuenta bacteriana total no debe exceder las 100 UFC/g. La presencia de hongos y levaduras debe ser menor a 10 UFC/g cada uno, mientras que los coliformes y *E. coli* deben estar por debajo de 3. Asimismo, el producto debe estar libre de *Salmonella spp.* en 25 gramos de muestra. Estos parámetros aseguran que el jarabe cumpla con los estándares de seguridad alimentaria y minimice riesgos para el consumidor (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2016).

En cuanto a su perfil sensorial, gracias a su gran poder edulcorante, en la elaboración de productos como galletas, barras de granola, pan tostado y *muffins* el jarabe de aguamiel mejora el sabor, olor y aceptabilidad, con colores más acentuados como resultado de la formación de melanoidinas por la interacción de la fructosa con los grupos amino de los aminoácidos. También las mermeladas elaboradas con manzana y chayote endulzadas con jarabe de aguamiel son mejor aceptadas que aquellas a las que se le ha adicionado azúcar (Huezcas-Garrido et al., 2022).

Debido a los fructanos que contiene el agave desde un principio, se espera emplearlos como aditivos ya sean estabilizantes y prebióticos por la fibra soluble dietaria. Al ser un producto 100% de agave, le da un punto a favor para ser empleado por la gente vegana aplicado en productos como endulzante natural, bebidas preparadas, fármacos, bebidas energéticas y barras de energía. Otras aplicaciones que ya no tienen que ver con el veganismo, son para la industria láctea y postres (Saraiva et al., 2022).

En un estudio del posible reemplazo de la sacarosa por jarabe de aguamiel normal o parcialmente hidrolizado en productos horneados, los resultados mostraron diferencias significativas entre estos y la sacarosa. Para la evaluación sensorial, ambos tipos de jarabe son buenas alternativas arriba del 75% de la sustitución de sacarosa. Cuando esta se sustituye al 100% los productos presentan una mejor textura, olor, sabor, color y de manera general una mayor aceptabilidad. Se evidenció que con el uso del jarabe parcialmente hidrolizado la estabilidad del producto es mayor, mientras que el jarabe normal también mejora las propiedades organolépticas de estos alimentos, hay propiedades como la textura, y el color en las que empleando ambos jarabes se obtienen resultados similares, siendo la segunda mejor opción después del jarabe parcialmente hidrolizado (Ozuna et al., 2020).

1.4.1. Diferencia entre mieles y jarabes

El jarabe más bien es una solución acuosa concentrada de azúcares (ya sean glucosa, fructosa o sacarosa) que se obtienen de fuentes vegetales con ayuda de tratamientos térmicos o hidrólisis (Mellado-Mojica & López-Pérez, 2013). Según la NMX-FF-110-SCFI-2008, este se define como “el líquido dulce obtenido de la hidrólisis de los fructanos contenidos en el agave” (Secretaría de Economía, 2008).

A diferencia del jarabe, la miel es más bien esa sustancia producida a partir del néctar de las flores, que las abejas recogen, transforman y combinan con enzimas específicas propias (como la glucosa oxidasa e invertasa) para convertirla en la popular miel de abeja que usamos en nuestra comida (Secretaría de Economía, 2007).

1.4.2. Clasificación de jarabes naturales

En la industria alimentaria, hay una gran variedad de jarabes cuya materia prima influye enormemente en la percepción de las propiedades organolépticas del producto final y se enlistan a continuación (Arvizu-Castro et al., 2016):

Jarabe de Arce: Viene de la savia del género *Acer*. Se concentra por evaporación para alcanzar 66°Brix.

Jarabe de Caña: Proveniente del jugo de caña (*Saccharum officinarum*). Se obtiene por clarificación y evaporación hasta alcanzar alrededor de 79° Brix.

Jarabe de Maíz: Es producto de la hidrólisis del almidón de maíz, un ejemplo de sus tantas variantes es el de alta fructosa (HFC)

1.5. Implicaciones en el proceso de elaboración del jarabe de aguamiel

1.5.1. Operaciones unitarias

Las operaciones unitarias en el procesado de alimentos incluyen procesos químicos, bioquímicos y físicos que modifican el estado de la materia prima para obtener un producto final con características deseadas (Malekjani & Jafari, 2021).

Debido a la gran diversidad de alimentos y procesos, el estudio de los mismos puede resultar complicado, es especial cuando se buscan implementar en proceso innovadores o tradicionales no descritos concretamente, no obstante, el dividir esos procesos en las operaciones unitarias que los componen facilita la comprensión de los mismos. Las operaciones unitarias se organizan en operaciones de transporte de material, transferencia de calor, transferencia de masa o una combinación de estas, suelen ser operaciones comunes como la reducción de tamaño o el mezclado o el deshidratado de los alimentos (Tadini & Gut, 2022).

En la Tabla 1.4 se presentan operaciones unitarias clasificadas en su función durante el procesamiento (Hassoun et al., 2024).

La clasificación de las operaciones unitarias en la industria alimentaria permite comprender cómo cada etapa contribuye a la calidad, seguridad y vida útil del producto final. La preparación se centra en acondicionar la materia prima, eliminando impurezas y ajustando características físicas para un procesamiento eficiente. El procesamiento y transformación abarca técnicas que modifican las propiedades del alimento, ya sea para mejorar su aceptabilidad sensorial, su valor nutricional o su seguridad. La estabilización y preservación es clave para controlar el deterioro microbiológico y químico, mientras que el envasado y transporte garantiza que el producto llegue en condiciones óptimas al consumidor (Hassoun et al., 2024).

Tabla 1.4: Operaciones unitarias para el jarabe de aguamiel

Categoría	Descripción breve	Ejemplos	Objetivo
Preparación	Etapas previas al proceso	Limpieza, clasificación, corte, mezclado	Materia prima apta y uniforme

Categoría	Descripción breve	Ejemplos	Objetivo
Procesamiento	Cambios físicos/químicos	Calentamiento, fermentación, deshidratación	Mejorar seguridad, vida útil y calidad
Preservación	Evitar deterioro	Secado, enlatado, congelación, irradiación	Inhibir microbios y reacciones indeseadas
Envasado y transporte	Protección y distribución	Envases varios, atmósfera modificada, frío	Mantener fresca y seguridad hasta consumo

La evaporación es una de las operaciones unitarias más comunes, esta se puede llevar a cabo de diferentes maneras dependiendo las necesidades y recursos. El proceso consiste en la condensación de los líquidos contenidos en los alimentos mediante el calor, elevando temperaturas al punto de ebullición, en el cual una cantidad particular de agua es removida del alimento. Esta operación se suele utilizar en la industria para alimentos como jugos, bebidas lácteas, azúcar, aceite comestible o purés, dando como resultados productos más concentrados (Jafari et al., 2024).

En la elaboración del jarabe de aguamiel la evaporación permite obtener un jarabe rico en fructosa, logrando un sabor dulce más concentrado en comparación al aguamiel o procesado (González-Montemayor et al., 2020).

1.5.2. Estandarización y normatividad de edulcorantes naturales

La creciente preferencia de los consumidores por endulzantes percibidos como naturales ha incrementado la atención en la estandarización, el control de calidad y la regulación de productos como el jarabe de aguamiel, el jarabe de arce, la miel y los jarabes de caña. Este fenómeno requiere el cumplimiento riguroso de marcos regulatorios internacionales, como el Codex Alimentarius, y de normativas nacionales específicas. El Codex Alimentarius establece la definición de edulcorantes no nutritivos, categoría que incluye productos derivados de fuentes naturales, lo que añade complejidad a su etiquetado y comercialización bajo la denominación de “natural” (Russell et al., 2021).

La percepción del consumidor influye directamente en el valor de mercado de estos productos, observándose una mayor intención de compra hacia aquellos que declaran el uso de endulzantes naturales, lo que mejora su aceptación y rentabilidad (C. T. M. Pereira et al., 2022). Esta dinámica subraya cómo la estandarización y el control de calidad trascienden el ámbito técnico para afectar el comportamiento del mercado. En este contexto, la autenticidad del producto se erige como un componente central de la garantía de calidad. La consistencia en los procesos de producción es indispensable para mantener la integridad del producto y cumplir con los estándares regulatorios, lo que hace necesario monitorizar perfiles de azúcares y otras variables que puedan verse alteradas por las variaciones en el procesamiento (Karahan et al., 2023).

La demanda de transparencia en el etiquetado se ha convertido en una tendencia predominante. Las marcas que implementan declaraciones claras y alineadas con las expectativas de los consumidores obtienen mejores resultados comerciales (C. T. M. Pereira et al., 2022). Un etiquetado efectivo debe abordar de manera rigurosa la autenticidad y los potenciales casos de adulteración, así como evitar declaraciones azucaradas que puedan inducir a confusión (Padovan et al., 2024). Los marcos regulatorios existentes enfatizan la necesidad de prácticas de etiquetado específicas que fortalezcan la comprensión y confianza del consumidor. No obstante, las inconsistencias en las prácticas de etiquetado de los edulcorantes funcionales presentan desafíos significativos para consumidores y productores, complicando la toma de decisiones y generando interrogantes sobre el cumplimiento normativo (Zidar et al., 2025). Por lo tanto, la implementación de un control de calidad riguroso por parte de los fabricantes es un requisito indispensable para garantizar la precisión y conformidad del etiquetado.

Planteamiento del problema

LA ELABORACIÓN de jarabe de aguamiel se realiza sin control ni documentación de las condiciones físicas críticas del proceso de concentración (perfil de temperatura-tiempo, presión atmosférica o vacío, y agitación), lo que genera lotes con variaciones significativas en °Brix, viscosidad, color ($L^*a^*b^*$) y actividad de agua. Esta falta de estandarización impide definir parámetros de proceso reproducibles, dificulta el cumplimiento de criterios de calidad y limita la comparabilidad con productos estandarizados en el mercado. El estudio se enfocará en identificar y fijar rangos operativos de esas variables físicas durante la concentración del aguamiel que produzcan jarabes con propiedades fisicoquímicas consistentes entre lotes (variación \leq un umbral predefinido), estableciendo así bases técnicas para control de proceso y aseguramiento de calidad.

Justificación

LA ESTANDARIZACIÓN de las condiciones físicas para producir jarabe de aguamiel es necesaria para resolver un problema práctico y documentado en el sector: la alta variabilidad del producto final. La ausencia de parámetros definidos de proceso (tiempo y temperatura de calentamiento) y de calidad (color, °Brix, pH y acidez) genera lotes con diferencias significativas en sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales, lo que limita la aceptabilidad del consumidor, dificulta el cumplimiento de normas de calidad e inocuidad y reduce la competitividad de pequeños productores que buscan diversificar más allá del pulque.

En el plano académico, el estudio aportará evidencia cuantitativa sobre la relación causa-efecto entre variables de proceso y atributos de calidad del jarabe de aguamiel. Al establecer rangos de referencia y puntos críticos de control, se contribuirá a consolidar modelos de estandarización aplicables a matrices azucaradas de origen vegetal. Este conocimiento es transferible y replicable, pues permitirá comparar tecnologías de concentración y validar hipótesis sobre cómo el control térmico impacta en parámetros clave (°Brix, pH, acidez y color), fortaleciendo la base científica para futuras investigaciones de vida de anaquel, escalamiento y optimización energética.

El impacto práctico será inmediato, un protocolo de elaboración con especificaciones medibles para obtener un jarabe seguro, homogéneo y de calidad constante. Esto facilitará la trazabilidad, reducirá mermas y retrabajos, mejorará la percepción del consumidor, y abrirá oportunidades de certificación y acceso a mercados con mayor valor agregado. En suma, estandarizar las condiciones físicas no solo fortalecerá la economía local mediante productos diferenciados y confiables, sino que también elevará el nivel tecnológico del proceso, ofreciendo beneficios claros y verificables para productores, consumidores y la comunidad científica.

Hipótesis

EL CONTROL simultáneo del tiempo y la temperatura de calentamiento estandariza el jarabe de aguamiel: para combinaciones predefinidas tiempo-temperatura, los valores de °Brix, pH, acidez titulable y color quedan dentro de rangos meta reproducibles entre lotes, y pueden predecirse mediante un modelo función de tiempo y temperatura.

5.1. Objetivo general

ESTANDARIZAR LAS condiciones físicas de producción de jarabe de aguamiel mediante el control de las variables de tiempo y temperatura, con el propósito de obtener un producto homogéneo y estable en sus propiedades fisicoquímicas.

5.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del aguamiel fresco ($^{\circ}$ Brix, pH, acidez y color) mediante técnicas analíticas, con el fin de establecer una línea base de sus características iniciales.
2. Analizar las propiedades fisicoquímicas del jarabe de aguamiel (pH, acidez, color y $^{\circ}$ Brix) elaborado bajo distintas condiciones de producción, con el fin de identificar los parámetros que generen un producto más uniforme y estable.
3. Proponer un rango de condiciones estandarizadas de tiempo y temperatura que permitan optimizar la producción de jarabe de aguamiel con características reproducibles y de calidad constante.
4. Evaluar el efecto de diferentes combinaciones de tiempo y temperatura en el proceso de calentamiento del aguamiel, para determinar su influencia en las propiedades del jarabe obtenido.
5. Determinar el orden de reacción y la constante de velocidad (k) que mejor describen los cambios en los parámetros fisicoquímicos durante la concentración del aguamiel.

6.1. Materia prima

LAS MUESTRAS de aguamiel se recolectaron de productores locales ubicados en San Gabriel Azteca, municipio de Zempoala, Hidalgo, México. La recolección se realizó en horario matutino (06:00–08:00 h), con el fin de asegurar la frescura del material y minimizar procesos fermentativos espontáneos.

Cada una de las diferentes muestras solicitadas representa una serie, al ser 6 muestras de $21 \pm 1.5\text{L}$ se entiende que se harán 6 series para el estudio.

6.2. Descripción del estudio

El experimento se estructuró en 6 series independientes, cada una correspondiente a un lote diferente de aguamiel. Esta estrategia permitió considerar la variabilidad natural de la materia prima, asociada con factores ambientales, características fisiológicas de la planta y diferencias en el método de recolección.

- **Serie 1 y Serie 2:** El aguamiel se calentó hasta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se mantuvo a esa temperatura hasta alcanzar una concentración de $70\text{ }^{\circ}\text{Brix}$. El tiempo de tratamiento se registró a partir del momento en que la muestra alcanzó los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Serie 3 y Serie 4:** El calentamiento se realizó hasta $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, manteniéndose en esa condición hasta lograr los $70\text{ }^{\circ}\text{Brix}$. El tiempo de tratamiento se contabilizó desde que la muestra alcanzó los $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Serie 5 y Serie 6:** Se aplicó un tratamiento en rampa. Primero se elevó la temperatura hasta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, manteniéndose en ese nivel hasta alcanzar $50\text{ }^{\circ}\text{Brix}$. Posteriormente, la temperatura se redujo a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se mantuvo hasta completar la concentración final de $70\text{ }^{\circ}\text{Brix}$. El tiempo se registró a partir de que la muestra alcanzó los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La temperatura fue medida usando un termómetro infrarrojo de la marca Goxawee. Las mediciones se llevaron a cabo cada 60 minutos, registrando los datos obtenidos en la bitácora (González-Montemayor et al., 2020).

En todos los tratamientos se realizaron mediciones cada hora, de los siguientes atributos fisicoquímicos de calidad:

- Sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$)
- pH
- Acidez titulable total
- Espacio de color CIE-Lab (L^* , a^* y b^*)

Cada determinación se llevó a cabo por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los datos. El monitoreo se mantuvo hasta que todas las muestras alcanzaron la concentración final de 70 °Brix, lo que permitió comparar el efecto de las distintas condiciones térmicas sobre las características fisicoquímicas del jarabe de aguamiel. El procedimiento se basó en metodologías descritas en la literatura disponible (Castañeda-Ovando et al., 2023; Ozuna & Franco-Robles, 2022).

6.3. Determinación de propiedades fisicoquímicas

6.3.1. Sólidos solubles (°Brix)

La determinación de sólidos solubles totales (°Brix) se realizó con un refractómetro digital Reichert 13962000. El equipo se calibró previamente con agua destilada a temperatura ambiente. Posteriormente, se depositó una gota de muestra en el prisma del refractómetro y la lectura se efectuó a contraluz, de acuerdo con el procedimiento descrito en la literatura. Cada análisis se efectuó en triplicado y bajo condiciones ambientales controladas, con el fin de garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados (Mendoza et al., 2022; Moreno-Vilet et al., 2019).

6.3.2. pH

Por otra parte, para obtener los valores de pH se empleó un medidor de mesa para pH (modelo HI3512) de la marca HANNA. Se calibró con los buffers 4, 7 y 10 (marca HANNA) en diferentes vasos de precipitado de 50 mL rotulados con los nombres de cada uno de los buffers, añadiendo 30 mL de tal manera que el puente salino del electrodo esté completamente sumergido. Las lecturas de cada buffer para la calibración se realizaron por triplicado.

Una vez calibrado el equipo, se recolectaron 30 mL de muestra cada hora durante todo el proceso de concentración. Dependiendo del tratamiento térmico, el número de puntos de muestreo osciló en un rango entre 6 y 10 tomas, finalizando el seguimiento una vez alcanzados los 70°Bx. Las muestras obtenidas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se realizó la lectura con ayuda del potenciómetro, procurando que el electrodo quedara cubierto más arriba del nivel del puente salino. La metodología consideró lo descrito en estudios de productos similares (Toufeili et al., 2022). Este procedimiento se realizó por triplicado para obtener valores más exactos.

6.3.3. Acidez titulable total

La acidez titulable total (ATT) se determinó mediante titulación ácido-base con NaOH 0.1 N y fenolftaleína como indicador, siguiendo los siguientes pasos.

Estandarización de la solución de NaOH

Para garantizar la exactitud de la concentración, la solución de NaOH se estandarizó utilizando biftalato de potasio (KHP) como patrón primario. El reactivo se deshidrató previamente a 100 °C durante 2 h en estufa y se dejó reposar en desecador hasta alcanzar temperatura ambiente. Posteriormente, se pesaron 5 g \pm 0.001 g de KHP y se disolvieron en 15 mL de agua desionizada en un matraz Erlenmeyer. Se adicionaron 3 gotas de fenolftaleína y se tituló con la solución de NaOH hasta observar el cambio de color rosado persistente durante 30 s. La concentración real del NaOH se calculó y ajustó para obtener una normalidad exacta de 0.100 N \pm 0.002 N.

Procedimiento de titulación de las muestras

Se tomaron 5.00 mL de muestra de jarabe de aguamiel, previamente enfriada a 25 ± 1 °C, y se diluyeron con 15 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer de 125 mL. Se adicionaron 3 gotas de fenolftaleína y se procedió a la titulación con la solución estandarizada de NaOH 0.1 N hasta alcanzar el punto final, definido por la aparición de un color rosado tenue persistente durante 30 s.

Cálculo de resultados

Los resultados se expresaron como porcentaje de ácido láctico equivalente (% p/p), utilizando la siguiente ecuación (Ecuación 6.1) (Chavez et al., 2020; Noriega-Juárez et al., 2025; Seog et al., 2008):

$$ATT = \frac{A \times B \times C}{D} \times 100 \quad (6.1)$$

Donde:

- A = volumen de NaOH gastado (mL).
- B = normalidad de la solución de NaOH.
- C = factor de equivalencia del ácido láctico (0.090 g/meq).
- D = masa de la muestra analizada (g).

Cada análisis se realizó por triplicado y los resultados se reportaron como el promedio \pm desviación estándar.

6.3.4. Espacio de color

La determinación del color del aguamiel y del jarabe concentrado se realizó utilizando un colorímetro de sobremesa marca FRU, calibrado previamente con un patrón blanco de referencia estándar (placa de calibración provista por el fabricante). Las mediciones se realizaron utilizando un iluminante D65 y un ángulo de observación de 10° empleando el sistema CIE-L*a*b*, registrando los valores de:

- L*: luminosidad (0 = negro, 100 = blanco).
- a*: coordenada de cromaticidad en el eje verde (-) a rojo (+).
- b*: coordenada de cromaticidad en el eje azul (-) a amarillo (+).

Cada muestra fue analizada en triplicado, obteniéndose los promedios y desviaciones estándar de los parámetros L*, a* y b*. Para cada medición se utilizó un volumen homogéneo de muestra en cubetas transparentes, asegurando las superficies limpias, y ausencia de espuma con el fin de evitar interferencias en la lectura.

El método seguido se basó en procedimientos descritos en la literatura para productos con características similares (Castro-Díaz et al., 2017), adaptados a las condiciones del presente estudio.

6.4. Rendimiento

El rendimiento del jarabe de aguamiel se determinó mediante la relación entre la masa inicial de aguamiel procesado y la masa final del jarabe concentrado obtenido, utilizando la Ecuación 6.2. La metodología aplicada se adaptó de reportes previos en productos con características similares (de la Rosa et al., 2022).

$$Rendimiento(\%) = \frac{M_{final}}{M_{inicial}} \times 100 \quad (6.2)$$

Donde:

- $M_{inicial}$ = Masa del aguamiel fresco (kg).
- M_{final} = Masa del jarabe concentrado obtenido (kg).

Es importante señalar que el aguamiel presenta un contenido elevado de agua (aproximadamente 80–90 %) y una baja proporción de sólidos solubles (10–14 °Brix). Durante el proceso de concentración, la mayor parte del agua se elimina por evaporación, lo que reduce la masa del producto final y, al mismo tiempo, incrementa la concentración de sólidos solubles.

6.5. Determinación de azúcares por HPLC

El perfil de carbohidratos presentes en el jarabe de aguamiel se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), siguiendo el flujo de trabajo descrito a continuación.

1. Preparación de muestras

Las muestras se diluyeron al 2.5 % p/p (0.60 g de muestra aforado a 25 g con agua grado HPLC), se homogeneizaron y se filtraron a través de membranas de nylon de 0.22 μm para eliminar partículas en suspensión. Posteriormente, se colocaron en viales ámbar de 1.5 mL para su inyección por triplicado en el sistema cromatográfico.

2. Condiciones cromatográficas

El análisis se realizó en un sistema UHPLC Acquity Arc (Waters Corporation, MA, EE.UU.) acoplado a un detector de índice de refracción (RI 2414, Waters). Se empleó una columna de intercambio aniónico Rezex RCM-Monosaccharide Ca_2^+ (300 \times 7.8 mm, Phenomenex, EE.UU.), adecuada para la separación de carbohidratos. Las condiciones de operación fueron:

- Volumen de inyección: 10 μL
- Tiempo de corrida: 30 min
- Fase móvil: agua destilada grado HPLC
- Flujo: 0.6 mL/min (isocrático)
- Temperatura de columna: 65 $^\circ\text{C}$

3. Cuantificación

La identificación de los picos cromatográficos se realizó comparando los tiempos de retención con los de los estándares puros de glucosa, fructosa, sacarosa e inulina (fructanos). La cuantificación se efectuó mediante el método de área bajo la curva (AUC), utilizando curvas de calibración externas construidas a partir de soluciones estándar en concentraciones de 0 a 10 g/L.

La concentración de cada carbohidrato (C_i) se calculó de acuerdo con la Ecuación 6.3, basada en literatura que reporta análisis similares (Marson et al., 2020).

$$C_i = \frac{A_i - b}{m} \quad (6.3)$$

Donde:

- C_i = Concentración del azúcar i en la muestra (g/L).
- A_i = Área del pico cromatográfico del azúcar i .
- m = Pendiente de la curva de calibración.
- b = Intercepto de la curva de calibración.

4. Expresión de resultados

Los resultados se expresaron en g/L de muestra (en base húmeda), reportándose los valores promedio de glucosa, fructosa, sacarosa y fructanos para cada réplica analizada.

6.6. Modelado cinético de parámetros fisicoquímicos

Para evaluar los cambios en los atributos fisicoquímicos de calidad del aguamiel durante el proceso de estandarización, los datos experimentales se ajustaron a diferentes modelos matemáticos de cinética química (Jaimez-Ordaz et al., 2019; Kay, 2020; Park et al., 2018). Las ecuaciones empleadas (Ecuaciones 6.4, 6.5 y 6.6) corresponden a los modelos cinéticos de orden cero, primer orden y segundo orden, respectivamente.

$$Q = Q_0 \pm kt \quad (6.4)$$

$$\ln Q = \ln Q_0 \pm kt \quad (6.5)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} \pm kt \quad (6.6)$$

Donde:

- Q : Representa el atributo fisicoquímico de calidad monitoreado,
- k : Corresponde a la constante de velocidad de reacción (horas^{-1})
- t : Es el tiempo de proceso de concentración térmica (horas).

La implementación computacional de los modelos cinéticos se llevó a cabo en el lenguaje de programación R (versión 4.1.2). El flujo de trabajo se estructuró en las siguientes etapas:

1. **Lectura y preprocesamiento de datos:** se desarrolló una función personalizada para importar archivos `.csv` con doble encabezado (condiciones experimentales y series), transformándolos a un formato longitudinal (`tidy`) mediante `tidyr::pivot_longer`.
2. **Organización y depuración:** se emplearon `dplyr` y `stringr` para limpiar nombres de variables, recodificar condiciones experimentales (90 °C, 100 °C, rampa 100–90 °C) y estructurar los datos en series comparables.
3. **Ajuste de modelos cinéticos:** por cada serie experimental se ajustaron los tres modelos (orden 0, 1 y 2) utilizando regresiones lineales (`lm`). Para cada modelo se calcularon métricas de bondad de ajuste, incluyendo el coeficiente de determinación (R^2), el R^2 ajustado y el Criterio de Información de Akaike (AIC), definido como se muestra en la Ecuación 6.7. Donde k es el número de parámetros estimados en el modelo y L la máxima verosimilitud. Un valor menor de AIC indica un modelo con mejor equilibrio entre ajuste y simplicidad, lo cual permite seleccionar el modelo que describe con mayor precisión la evolución de cada atributo fisicoquímico bajo las condiciones evaluadas (Castillo et al., 2025).

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (6.7)$$

4. **Evaluación y visualización:** se empleó `ggplot2` para generar gráficos facetados con curvas ajustadas, y `broom` para extraer coeficientes y métricas estadísticas en formato tabular. Los resultados se exportaron en tres formatos:
 - PNG con las curvas ajustadas por serie y condición.
 - Archivo TXT con el resumen estadístico de cada modelo (parámetros, significancia, AIC).
 - Archivo CSV con las métricas comparativas de ajuste (R^2 , AIC, pendiente, intercepto).
5. **Reproducibilidad:** cada ajuste se ejecutó por triplicado y con semilla aleatoria fija (`set.seed = 42`) para asegurar la consistencia en la generación de resultados.

Este flujo de trabajo permitió evaluar de manera sistemática qué modelo describe con mayor precisión la evolución de cada atributo fisicoquímico bajo las condiciones térmicas de estandarización.

6.7. Modelado predictivo de °Brix a partir de parámetros de color

La implementación computacional del modelo predictivo se llevó a cabo en un entorno controlado de conda (versión 25.7.0), utilizando Python 3.13.5 como lenguaje de programación. Para el procesamiento y análisis de datos se emplearon las bibliotecas `pandas` (2.3.1) y `numpy` (2.2.6); la generación de gráficos y visualizaciones se realizó con `matplotlib` (3.10.5). El ajuste y validación de los modelos de regresión se efectuaron mediante `scikit-learn` (1.7.1), mientras que la serialización del modelo final se gestionó con `joblib` (1.5.1). El modelo predictivo busca evaluar si el color puede emplearse como predictor no destructivo del grado de concentración del jarabe bajo las distintas condiciones térmicas. El proceso se realizó en las siguientes etapas.

1. Preparación de datos

Los datos experimentales fueron preparados en archivos con formato CSV que contenían dos filas iniciales de encabezado: la primera correspondía a la condición de procesamiento (90 °C, 100 °C o rampa 100–90 °C) y la segunda a las series experimentales.

Cada archivo incluyó mediciones de sólidos solubles (°Brix) y de los atributos del espacio de color CIE-L*a*b*. Los datos fueron transformados a un formato longitudinal (`tidy data`), de modo que cada fila representara una combinación única de serie, condición, tiempo y valor medido. Posteriormente, se construyó una tabla supervisada en la cual los valores de L*, a* y b* fueron empleados como predictores y los valores de °Brix como variable de respuesta.

2. Variables del modelo

- Variable respuesta (Y): Grados Brix de la muestra.
- Variables predictoras (X_i): Coordenadas del espacio de color CIE-L*a*b* (L*, a*, b*).

De manera general, el modelo buscó establecer una relación de la forma (F.-L. Han et al., 2008):

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 L + \beta_2 a + \beta_3 b + \varepsilon \quad (6.8)$$

Donde:

- \hat{Y} = Valor predicho de °Brix.
- β_0 = Intercepción del modelo.
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Coeficientes de regresión asociados a cada predictor.
- ε = Término de error aleatorio.

3. Preprocesamiento y validación

Las variables predictoras (L*, a*, b*) fueron escaladas mediante normalización tipo **z-score**, con el fin de reducir sesgos asociados a diferencias de magnitud.

La validación de los modelos se realizó mediante un esquema de validación cruzada `GroupKFold`, en el cual los grupos correspondieron a las series experimentales. Este procedimiento aseguró que los datos de una misma serie no fueran utilizados simultáneamente en entrenamiento y prueba, favoreciendo la capacidad de generalización del modelo.

4. Modelos ajustados

Se evaluaron dos aproximaciones de regresión (F.-L. Han et al., 2008):

Regresión lineal múltiple (RLM) :

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \varepsilon \quad (6.9)$$

Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS):

Este método se basó en la construcción de componentes latentes (t_h) que maximizan la covarianza entre los predictores y la variable respuesta. El modelo general se expresó como (Nengsih et al., 2019):

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{h=1}^A c_h t_h + \varepsilon \quad (6.10)$$

Donde:

- A = Número de componentes latentes seleccionados.
- t_h = Componente latente h -ésimo.
- c_h = Coeficiente de regresión asociado a cada componente.

5. Métricas de desempeño

El desempeño de cada modelo fue evaluado mediante las siguientes métricas (Chicco et al., 2021):

Coefficiente de determinación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.11)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6.12)$$

Error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6.13)$$

Donde:

- y_i = Valor experimental observado.
- \hat{y}_i = Valor predicho por el modelo.
- \bar{y} = Promedio de los valores observados.
- n = Número de observaciones.

6. Selección del modelo

El modelo final fue seleccionado en función del mayor R^2 y los menores valores de RMSE y MAE. Adicionalmente, se calcularon gráficos de paridad (observado vs predicho) para visualizar la capacidad de predicción en cada condición experimental.

7.1. Determinación de propiedades fisicoquímicas

7.1.1. Sólidos solubles (°Brix)

La evolución del contenido de sólidos solubles totales (°Brix) durante el almacenamiento se evaluó mediante el ajuste de modelos cinéticos de orden cero, primer orden y segundo orden. El modelo de segundo orden presentó el mejor ajuste en la mayoría de las series experimentales, con valores de R^2 superiores a 0.97, lo que indica una alta capacidad para describir la dinámica de los cambios en los sólidos solubles. En contraste, los modelos de orden cero y primer orden mostraron desempeños inferiores, con valores promedio de R^2 de 0.77 y 0.93, respectivamente (Figura 7.1). Esto sugiere que la variación de los °Brix no sigue un patrón constante ni proporcional al contenido inicial, sino que responde a interacciones más complejas entre los componentes solubles y la matriz alimentaria.

La literatura reporta que la selección del modelo cinético adecuado depende de las condiciones del sistema y de los fenómenos involucrados. Los modelos de orden cero pueden ajustarse mejor cuando las variaciones en las tasas de degradación son mínimas y los cambios en los sólidos solubles son relativamente uniformes a lo largo del tiempo (Ali et al., 2018). Sin embargo, en escenarios donde las reacciones dependen de la concentración de los solutos, los modelos de primer orden resultan más apropiados, aunque su ajuste puede verse limitado por factores como la temperatura de almacenamiento (Zhang et al., 2016). En ciertos productos deshidratados, las coberturas y tratamientos aplicados modifican la retención de humedad y, por ende, alteran la cinética de liberación de azúcares, lo que favorece la aplicación de modelos de orden cero bajo condiciones específicas (Saini & Sharma, 2016).

El ajuste observado al modelo de segundo orden en este estudio refleja fenómenos fisicoquímicos complejos, como la hidrólisis progresiva de polisacáridos, la conversión de almidones a azúcares simples y la liberación gradual de compuestos solubles, procesos que dependen tanto del tiempo como de la concentración de los solutos (Duma et al., 2017).

La capacidad del modelo de segundo orden para describir de manera precisa los cambios en los sólidos solubles ofrece una herramienta útil para predecir la evolución de los °Brix y estimar tiempos críticos en los que se alcanzan concentraciones objetivo o límites de aceptación. Esta información es valiosa para diseñar estrategias de control y optimización del almacenamiento, así como para implementar tratamientos postcosecha que regulen la liberación de azúcares y preserven la calidad sensorial del producto.

En conclusión, la implementación del modelo de segundo orden fué un elemento fundamental para anticipar puntos críticos del proceso, estandarizar condiciones y garantizar lotes homogéneos. Esto sugiere que el procesamiento térmico del aguamiel se puede optimizar haciendo una buena selección de las condiciones de calentamiento, equilibrando la eficiencia de concentración con la preservación de la calidad del jarabe final.

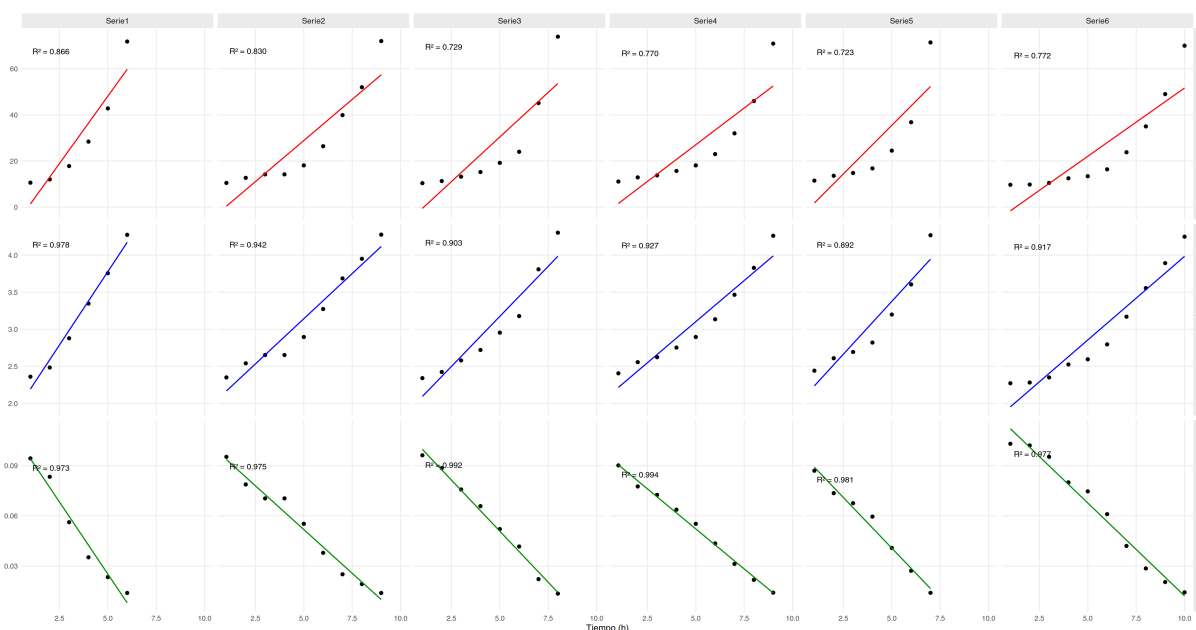


Figura 7.1: Evolución de los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) durante el procesamiento térmico.

7.1.2. pH

El monitoreo del pH en sistemas alimentarios permite comprender los mecanismos de deterioro y estimar la estabilidad durante el almacenamiento. En matrices vegetales y productos ricos en azúcares, las variaciones de pH influyen directamente en la estabilidad microbiológica, la calidad sensorial y la vida útil, por lo que modelar su comportamiento resulta una herramienta predictiva relevante (Meng et al., 2021; Purnamasari et al., 2025).

El análisis cinético mostró que el modelo de primer orden describió mejor la evolución del pH, con valores de R^2 más elevados y errores de ajuste menores en comparación con los modelos de orden cero y segundo orden (Figura 7.2). Este resultado concuerda con estudios que han reportado que las transformaciones del pH suelen seguir una relación logarítmica, ya que la velocidad de cambio depende del valor inicial y disminuye conforme el sistema evoluciona (Meng et al., 2021). Sin embargo, condiciones específicas, como reacciones químicas constantes o liberación uniforme de ácidos, pueden generar comportamientos de orden cero, donde la tasa de cambio se mantiene estable durante el tiempo de almacenamiento (Purnamasari et al., 2025).

Las constantes de velocidad (k) obtenidas indican que la disminución progresiva del pH está asociada con fenómenos como la liberación de compuestos ácidos, la actividad enzimática residual y la difusión de iones orgánicos e inorgánicos en la matriz. Este tipo de comportamiento ha sido reportado en sistemas de origen vegetal, donde los cambios en el pH reflejan procesos internos de degradación que impactan tanto la calidad como la aceptabilidad sensorial (Fu et al., 2019; Pramitasari et al., 2022). En productos susceptibles a fermentación espontánea, un pH bajo favorece la inhibición de bacterias patógenas y prolonga la vida útil, aunque puede alterar atributos sensoriales relacionados con sabor, textura y apariencia (Kong et al., 2023).

El control de la acidez también se vincula con estrategias tecnológicas emergentes para mantener la estabilidad del producto. Películas sensibles al pH y recubrimientos pueden ayudar a inhibir el crecimiento microbiano y prevenir deterioro (Abedi-Firoozjah et al., 2022; Shiri et al., 2025; Yanti et al., 2021). Estas aplicaciones tienen la finalidad de complementar el uso de modelos cinéticos para anticipar el momento en que el producto alcanza umbrales de aceptación.

En conjunto, la integración de modelos de primer orden con tecnologías de monitoreo basadas en sensores de pH mostró un mejor desempeño relativo para predecir la evolución de la acidez y gestionar la calidad de productos vegetales y de alta concentración de azúcares.

Finalmente, para poder explicar la evolución del pH en rampas térmicas, los modelos de primer orden

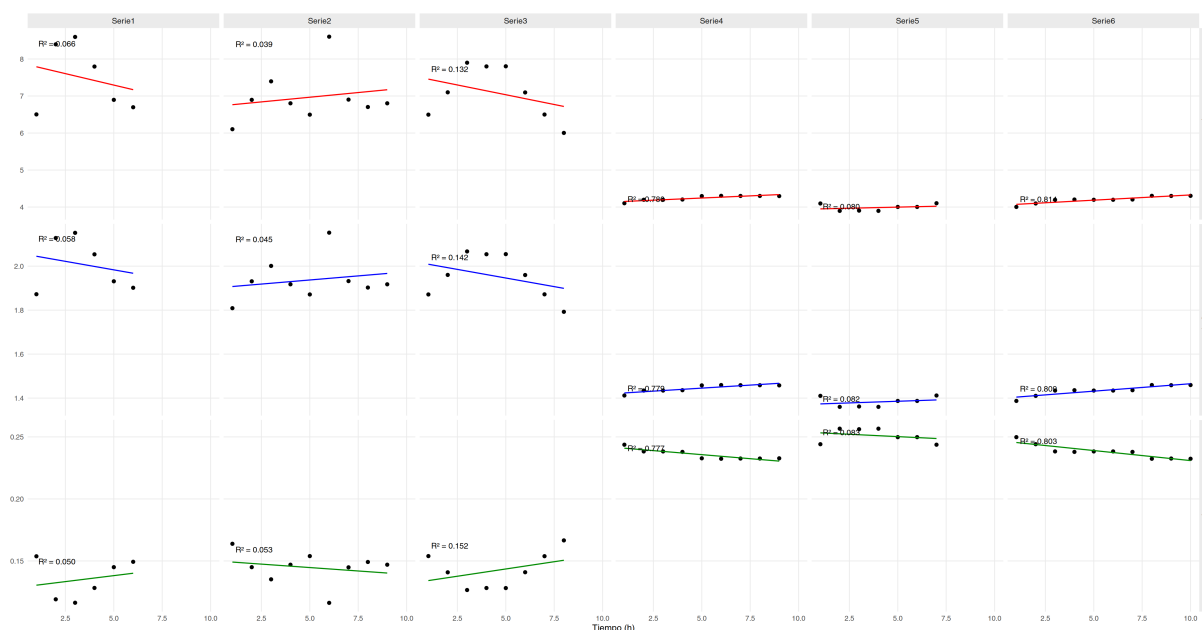


Figura 7.2: Variación del pH bajo diferentes tratamientos térmicos.

permiten establecer un marco sólido para el monitoreo en tiempo real. Esto con ayuda de modelos cinéticos con tecnologías de control pueden funcionar como una vía para gestionar la estabilidad del producto, asegurando que el ajuste de las condiciones térmicas no comprometa el balance entre el rendimiento y la preservación del jarabe.

7.1.3. Acidez titulable total

La evolución de la ATT en el jarabe de aguamiel mostró un comportamiento dependiente del perfil térmico aplicado. En los tratamientos isotérmicos a 90 y 100 °C, los mejores ajustes correspondieron a modelos de orden cero, con valores de R^2 de 0.53 en la Serie 2 a 100 °C y de 0.54 en la Serie 3 a 90 °C, acompañados de pendientes significativas de 0.0117 ($p = 0.0267$) y 0.0131 ($p = 0.0388$). Este patrón lineal refleja que la variación de la ATT ocurre a una tasa constante en el tiempo, independiente de la concentración inicial de ácidos. La dispersión observada en otras series bajo las mismas condiciones, con R^2 entre 0.35 y 0.38, evidencia la influencia de la heterogeneidad natural del aguamiel sobre el ajuste cinético (Figura 7.3).

En contraste, el tratamiento en rampa 100 a 90 °C presentó un ajuste más consistente a modelos de primer orden, con R^2 de 0.85 en la Serie 5 y de 0.78 en la Serie 6. Las pendientes obtenidas fueron estadísticamente significativas, con valores de 0.2009 ($p = 0.0030$) y 0.1392 ($p = 0.0007$), lo que indica que la tasa de cambio de la ATT dependió de la concentración presente en cada instante. Esta respuesta coincide con un comportamiento de dependencia exponencial, donde la concentración de ácidos orgánicos condiciona la velocidad de transformación durante el proceso térmico. Los valores de AIC respaldaron esta tendencia, ya que en rampa los mínimos se situaron cercanos a cero, mientras que en los modelos de segundo orden se registraron valores más elevados, a pesar de presentar coeficientes de determinación altos.

La literatura en matrices afines, como la miel y productos relacionados, ha documentado que la naturaleza del perfil térmico determina la estabilidad de los compuestos orgánicos. En condiciones isotérmicas se ha observado una preservación más consistente de la acidez y del perfil enzimático, mientras que los tratamientos dinámicos aceleran la degradación y favorecen la formación de compuestos de transformación como el hidroximetilfurfural (Braghini et al., 2019; Cavaco et al., 2021; Huang et al., 2019; Zarei et al., 2019). Estudios recientes también indican que el calentamiento suave permite conservar con mayor eficacia los ácidos orgánicos y, por tanto, estabilizar atributos de calidad (Ng et al., 2023).

En términos de aplicación, los modelos de orden cero obtenidos bajo isotermas permiten predecir la evolu-

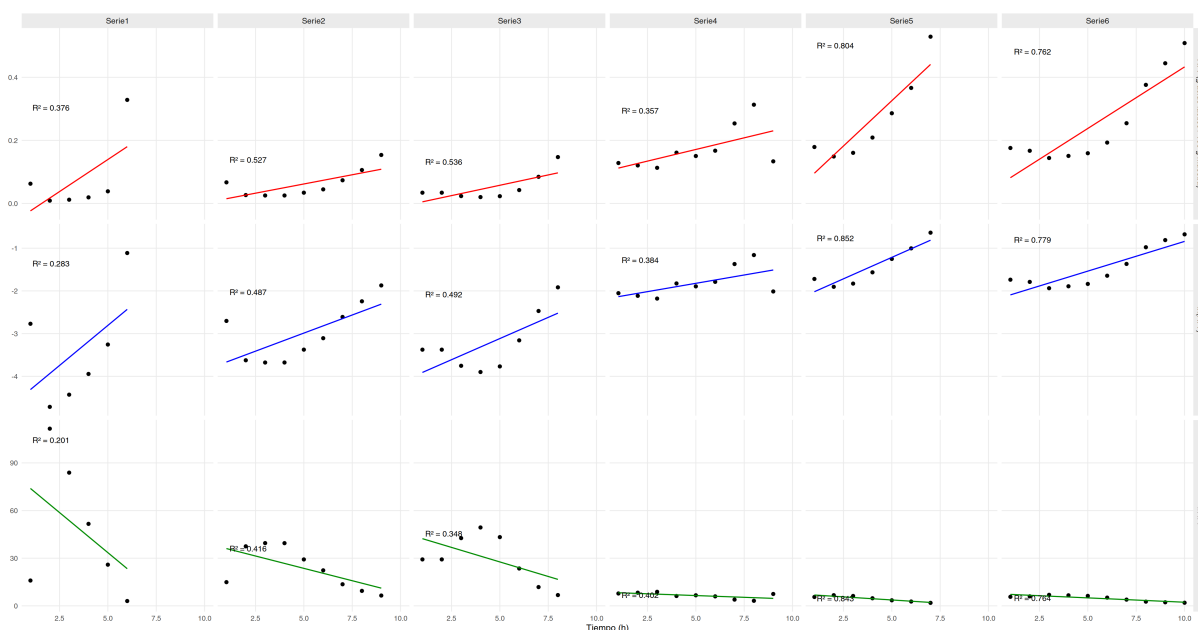


Figura 7.3: Cinética de variación de la acidez titulable total (ATT) del aguamiel durante el procesamiento térmico.

ción de la acidez a través de tasas constantes, lo que facilita la estandarización del tiempo de procesamiento. En cambio, los ajustes de primer orden bajo rampas térmicas sugieren un control más dependiente de la concentración, con la ventaja de proporcionar predicciones reproducibles y de mayor precisión. En ambos casos, el modelado cinético de la ATT constituye una herramienta útil para anticipar la evolución del perfil ácido durante el calentamiento, con implicaciones directas en la estabilidad fisicoquímica, el perfil sensorial y la estandarización tecnológica del jarabe de aguamiel.

En síntesis, los modelos de primer orden explicaron mejor el comportamiento del pH y la acidez en rampas térmicas, esto es clave para estandarizar condiciones, pues la temperatura incide directamente en el balance entre la eficiencia del proceso y la estabilidad del perfil ácido del producto final.

7.1.4. Espacio de color

Parámetro L^*

El valor L^* del espacio de color CIE-Lab, que representa la luminosidad de la muestra, presentó un comportamiento descendente durante el procesamiento térmico del aguamiel. En las condiciones isotérmicas a 100 °C, los modelos mostraron un ajuste moderado en la Serie 1, con un R^2 de 0.54 para orden cero y una pendiente de -4.18 ($p = 0.095$), mientras que en la Serie 2 los resultados fueron más consistentes, con un R^2 de 0.77 en orden cero y una pendiente de -4.63 ($p = 0.002$). Estos valores indican un oscurecimiento progresivo de las muestras, descrito adecuadamente por modelos lineales, aunque en algunos casos la variabilidad redujo la significancia estadística. Los modelos de orden 1 y 2 también alcanzaron ajustes similares en la Serie 2, pero sin mejorar de manera clara la descripción del fenómeno respecto al modelo lineal (Figura 7.4).

En las condiciones isotérmicas a 90 °C, la tendencia fue más definida. En la Serie 3, los tres modelos presentaron un ajuste elevado, con R^2 superiores a 0.87 y pendientes negativas significativas, siendo el orden cero el que describió de manera más sencilla el comportamiento (pendiente -3.30, $p < 0.001$). En la Serie 4 los resultados fueron más variables, con R^2 alrededor de 0.57 para los tres modelos y pendientes negativas en torno a -2.28 ($p = 0.018$ en orden cero). Estos resultados indican que la reducción de la luminosidad bajo 90 °C sigue un patrón consistente y reproducible, aunque con diferencias en magnitud entre series.

El tratamiento en rampa 100 a 90 °C mostró ajustes aceptables en la Serie 5, con R^2 de 0.73 para orden cero y de 0.74 para orden uno, además de pendientes negativas de -2.68 ($p = 0.014$) y -0.052 en log-transformación ($p = 0.013$). En este caso, tanto la descripción lineal como la logarítmica reflejaron de manera adecuada el

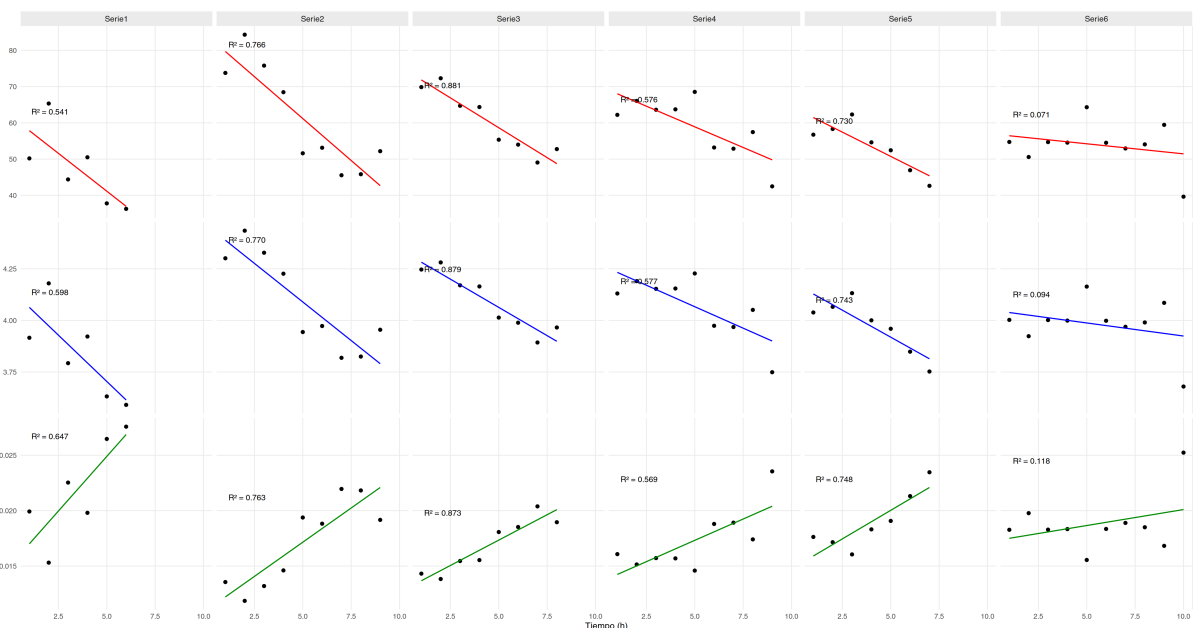


Figura 7.4: Modelado cinético del valor L^* durante el procesamiento térmico de aguamiel

oscurecimiento progresivo. Sin embargo, en la Serie 6 bajo la misma condición, el ajuste fue muy bajo ($R^2 < 0.12$ en los tres modelos), sin pendientes significativas, lo que sugiere una mayor variabilidad experimental o diferencias en la composición inicial de esa serie que enmascararon la tendencia.

El descenso de L^* durante el calentamiento concuerda con la literatura que describe la formación de productos de pardeamiento no enzimático y la concentración de pigmentos asociados a las reacciones de Maillard y caramelización en miel y jarabes (Braghini et al., 2019; Cavaco et al., 2021). En productos similares se ha observado que la pérdida de luminosidad se acentúa conforme aumenta la severidad térmica y el tiempo de exposición, lo que coincide con los resultados obtenidos, donde las isotermas de 90 y 100 °C produjeron disminuciones más consistentes que las rampas. Estos cambios en la luminosidad reflejan transformaciones químicas en los azúcares y ácidos orgánicos, y además están relacionados con atributos sensoriales y de aceptación del producto final. El modelado cinético de L^* permitió establecer que el oscurecimiento del jarabe de aguamiel puede describirse mayormente por modelos de orden cero en isotermas y, en ciertos casos, por ajustes logarítmicos en rampas térmicas, lo que aporta una herramienta para predecir la evolución del color bajo diferentes condiciones de procesamiento.

Los resultados y la evidencia reportada en otras matrices confirman que el valor L^* constituye un indicador sensible de las transformaciones asociadas al pardeamiento no enzimático durante el procesamiento térmico. La aplicación de modelos de orden cero y de primer orden permite describir con eficacia la pérdida de luminosidad, lo que se vincula directamente con la formación de productos de reacción de Maillard y caramelización bajo condiciones de calentamiento sostenido. La concordancia entre los patrones observados en el aguamiel y los descritos en jarabes, mieles y jugos de frutas (Khalil et al., 2019; Lyu et al., 2018; Quayson et al., 2021; Tounsi & Kechaou, 2022; A.-N. Yu et al., 2017; A.-N. Yu & Tang, 2016) refuerza la utilidad del modelado cinético como herramienta para anticipar cambios de color y orientar el diseño de perfiles térmicos que favorezcan la estabilidad visual y la aceptación del producto final.

Parámetro a^*

El parámetro a^* del espacio de color CIE-Lab, asociado con la transición del verde (valores negativos) al rojo (valores positivos), mostró incrementos claros durante el procesamiento térmico del aguamiel. En las condiciones isotérmicas a 100 °C, los ajustes alcanzaron elevados coeficientes de determinación. En la Serie 1, el modelo de segundo orden presentó el mejor desempeño ($R^2 = 0.96$; pendiente -0.071, $p = 0.0007$), aunque el primer orden también explicó adecuadamente la variación ($R^2 = 0.95$; pendiente 0.329, $p = 0.001$). La Serie 2 reforzó esta tendencia con ajustes sobresalientes en los modelos de primer ($R^2 = 0.97$; pendiente 0.283, p

< 0.001) y segundo orden ($R^2 = 0.97$; pendiente -0.087 , $p < 0.001$). Estos resultados evidencian un aumento progresivo en la componente rojiza, lo que puede vincularse con la acumulación de compuestos cromóforos derivados de reacciones de Maillard y caramelización bajo alta temperatura (Figura 7.5).

A $90\text{ }^\circ\text{C}$, el comportamiento fue similar aunque con menor magnitud. En la Serie 3, los modelos de primer y segundo orden describieron adecuadamente la cinética, con R^2 de 0.88 y 0.92 respectivamente, y pendientes significativas (0.261 y -0.070 , $p < 0.001$). En la Serie 4, el ajuste más consistente se observó en el segundo orden ($R^2 = 0.83$; pendiente -0.037 , $p = 0.0007$), mientras que el primer orden también explicó parte de la variación ($R^2 = 0.77$; pendiente 0.180 , $p = 0.0018$). Estos hallazgos indican que, incluso a temperaturas menos intensas, el proceso de pardeamiento se manifiesta en la dimensión cromática a^* , con una trayectoria que puede describirse tanto de manera exponencial como por reciprocidad.

El tratamiento en rampa 100 a $90\text{ }^\circ\text{C}$ mostró patrones intermedios. En la Serie 5, los tres órdenes presentaron ajustes aceptables (R^2 entre 0.68 y 0.74), con pendientes de magnitud moderada (0.574 en orden cero y 0.119 en orden uno). En la Serie 6, el comportamiento fue más claro: el modelo de segundo orden ofreció el mejor ajuste ($R^2 = 0.77$; pendiente -0.031 , $p < 0.001$), mientras que el de primer orden también fue consistente ($R^2 = 0.73$; pendiente 0.140 , $p = 0.0016$). Estos resultados reflejan que los cambios en a^* durante la rampa se producen de forma continua y acumulativa, con cinéticas que sugieren tanto dependencias logarítmicas como relaciones inversas.

En conjunto, la evolución positiva de a^* confirma la intensificación de tonalidades rojizas conforme aumenta la severidad térmica y el tiempo de exposición. Este comportamiento es consistente con lo observado en jarabes y mieles, donde el incremento de la componente roja ha sido asociado con la progresiva formación de melanoidinas y otros productos de pardeamiento no enzimático (Khalil et al., 2019; Lyu et al., 2018). La aplicación de modelos de primer y segundo orden en las distintas condiciones permite describir con precisión este fenómeno, ofreciendo un marco predictivo para anticipar modificaciones en el color del aguamiel procesado y su impacto en atributos sensoriales y de calidad visual.

En síntesis, el análisis cinético de los cambios en el parámetro a^* del espacio CIE-Lab ofrece un marco sólido para comprender cómo las reacciones de pardeamiento no enzimático, particularmente la reacción de Maillard, la caramelización y la formación de melanoidinas, modifican el eje verde-rojo durante el procesamiento térmico de matrices como jarabes, miel, aguamiel y jugos de frutas. El incremento progresivo en los valores positivos de a^* refleja la acumulación de pigmentos rojizos asociados con estas transformaciones químicas (Dhungel et al., 2018; Smith et al., 2015; P. Yu et al., 2015). La aplicación de modelos cinéticos de orden cero, primero y segundo ha permitido describir con precisión estas variaciones, mostrando que en algunos sistemas el cambio de color sigue trayectorias proporcionales al tiempo, mientras que en otros la interacción entre sustratos reactivos condiciona la velocidad de formación de compuestos coloreados (Alkanan et al., 2024; Gérard et al., 2022; Xu et al., 2023). Desde la perspectiva de la calidad, un aumento en la componente rojiza está vinculado con la estabilidad del producto y se asocia con la percepción sensorial de sabores más intensos y deseables, fenómeno documentado en la correspondencia entre color y gusto (Garber et al., 2016; Spence et al., 2015). De este modo, el modelado cinético de a^* proporciona herramientas predictivas para el control del proceso térmico y orienta estrategias para preservar la aceptabilidad y confianza del consumidor, equilibrando la estabilidad cromática con la inocuidad y el atractivo de los alimentos procesados (H. Li et al., 2021; Shamsi & Khalilabadi, 2022; Q. Yu et al., 2025).

Parámetro b^*

El parámetro b^* del espacio CIE-Lab, que representa la transición del azul (valores negativos) al amarillo (valores positivos), mostró un incremento constante durante el procesamiento térmico del aguamiel, indicando un viraje hacia tonalidades amarillentas conforme aumentó la severidad de los tratamientos (Figura 7.6). Bajo la condición isotérmica de $100\text{ }^\circ\text{C}$, las series analizadas presentaron incrementos notables con altos coeficientes de determinación. En la Serie 1, el modelo de orden cero explicó gran parte de la variación ($R^2 = 0.93$; pendiente 2.41 , $p = 0.0018$), mientras que el primer orden ofreció un ajuste igualmente sólido ($R^2 = 0.93$; pendiente 0.263 , $p = 0.0019$). En la Serie 2, el mejor ajuste correspondió al primer orden ($R^2 = 0.96$; pendiente 0.327 , $p < 0.00001$), reflejando un comportamiento exponencial en la intensificación del color amarillo. Estos resultados sugieren que la acumulación de compuestos derivados de caramelización y reacciones de Maillard influye directamente en el aumento de b^* .

A $90\text{ }^\circ\text{C}$, el comportamiento fue consistente aunque con variabilidad entre series. En la Serie 3, el primer orden mostró un ajuste sobresaliente ($R^2 = 0.96$; pendiente 0.381 , $p < 0.00002$), mientras que en la Serie

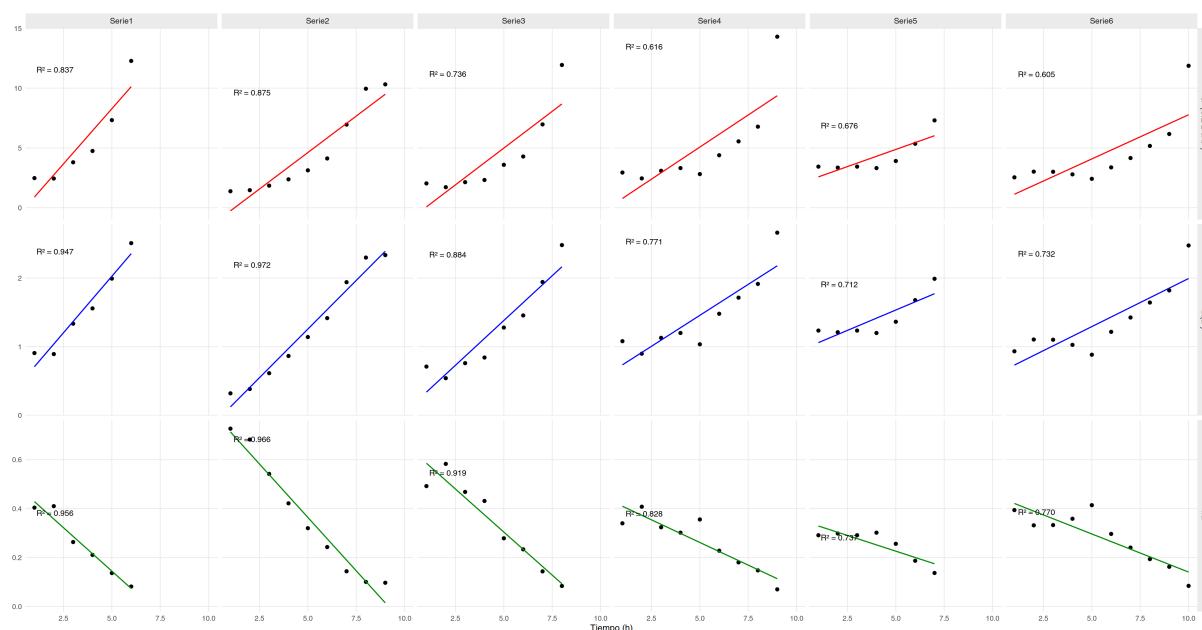


Figura 7.5: Modelado cinético del valor a^* durante el procesamiento térmico de aguamiel

4 tanto el primer como el segundo orden describieron con precisión el fenómeno ($R^2 = 0.96$ en ambos casos; pendientes 0.219 y -0.023, $p < 0.00001$ y $p < 0.00001$ respectivamente). Esto indica que, incluso a temperaturas más bajas, los mecanismos asociados al pardeamiento no enzimático generan un viraje hacia tonalidades amarillas, coherente con la formación progresiva de pigmentos intermedios.

En los tratamientos en rampa 100 a 90 °C se observó una tendencia intermedia, con incrementos graduales en b^* descritos adecuadamente por modelos de primer y segundo orden. La Serie 5 presentó un ajuste elevado en segundo orden ($R^2 = 0.96$; pendiente -0.022, $p = 0.0001$), lo que sugiere una relación más compleja entre los reactivos en el desarrollo del color. En la Serie 6, el mejor desempeño se observó también en el segundo orden ($R^2 = 0.93$; pendiente -0.029, $p < 0.00001$), confirmando la utilidad de estos modelos para describir trayectorias de formación de compuestos cromóforos bajo condiciones dinámicas de calentamiento.

En conjunto, la evolución positiva de b^* evidencia que el aguamiel sometido a calentamiento adquiere progresivamente tonalidades amarillas, fenómeno documentado en jarabes y jugos donde el aumento en esta coordenada se asocia con el desarrollo de productos de caramelización y pigmentos de Maillard (Lyu et al., 2018; Tounsi & Kechaou, 2022). La aplicación de modelos de primer y segundo orden no solo permitió describir adecuadamente estas transformaciones, sino también establecer un marco predictivo para el control del color durante el procesamiento térmico, aspecto clave para preservar la aceptación sensorial y la calidad visual del producto.

Los cambios observados en el parámetro b^* durante el procesamiento térmico del aguamiel reflejan la intensificación de tonalidades amarillas asociadas a reacciones de pardeamiento no enzimático, en particular la reacción de Maillard y la caramelización. Diversos estudios han documentado que este comportamiento es común en jugos, mieles y jarabes, donde el incremento de b^* se vincula a la acumulación de pigmentos amarillos y marrones derivados de la degradación térmica de azúcares y aminoácidos (Farag et al., 2020; Nagai et al., 2018). La modelación cinética aplicada a estos cambios ha mostrado que tanto órdenes cero como primero pueden describir de forma adecuada la evolución de b^* , dependiendo de la composición del alimento y las condiciones de tratamiento (Karadeniz et al., 2024; Shamsudin et al., 2021). Este comportamiento ha sido constatado también en jugos de frutas como granada y pera, donde el calentamiento prolongado conduce a disminuciones o incrementos de b^* según el perfil fenólico y el pH del sistema (M. Han et al., 2025; Khajehei et al., 2015).

El impacto de estos cambios en la percepción de calidad es relevante, ya que un aumento en la componente amarilla suele asociarse con atributos de madurez, frescura y riqueza de sabor, lo cual influye en la aceptación

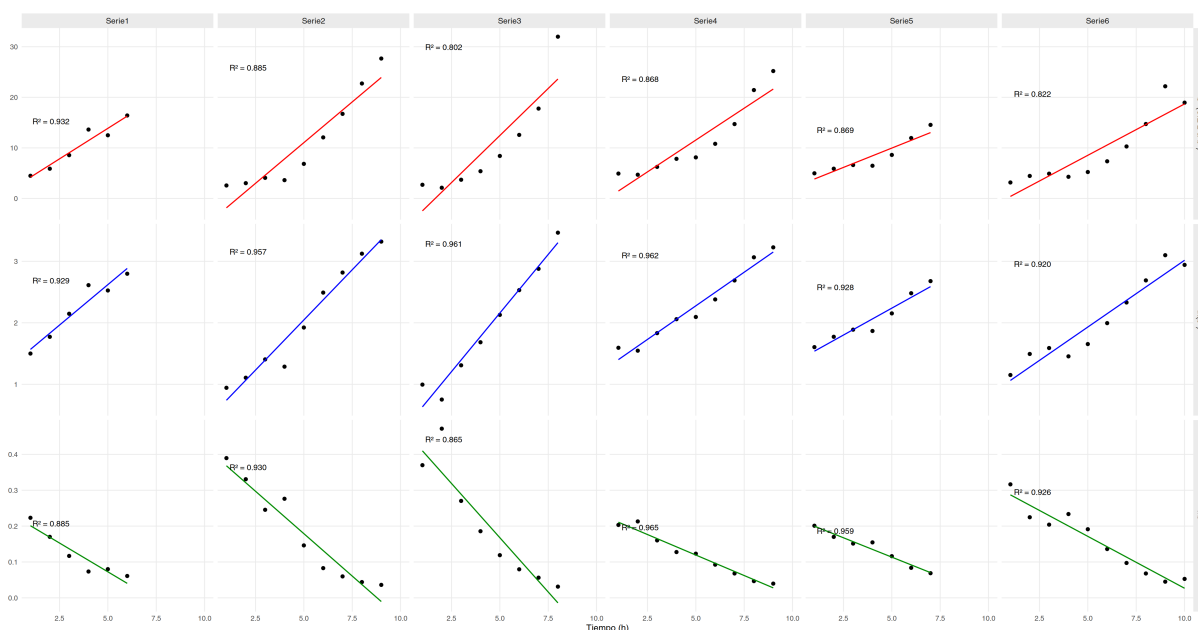


Figura 7.6: Modelado cinético del valor b^* durante el procesamiento térmico de aguamiel

del consumidor (Buvé et al., 2021). Asimismo, la formación de compuestos como el 5-hidroximetilfurfural, relacionado con la intensificación del color amarillo-marrón, constituye un marcador de transformación térmica y calidad en productos vegetales y apícolas (Farag et al., 2020). En este contexto, el modelado cinético del parámetro b^* se posiciona como una herramienta útil para anticipar cambios cromáticos, optimizar condiciones de procesamiento y garantizar que el color final del producto mantenga tanto estabilidad como aceptación sensorial.

El modelado cinético aplicado a los parámetros fisicoquímicos y de color del aguamiel procesado térmicamente permitió describir con detalle la dinámica de transformación bajo distintas condiciones de calentamiento. La identificación de los modelos con mejor ajuste aporta herramientas predictivas para anticipar cambios en °Brix, pH, ATT y coordenadas de color CIE-Lab, lo que contribuye tanto a la comprensión de los procesos de pardeamiento como a la estandarización tecnológica del producto. Con el fin de respaldar esta discusión y ofrecer una visión más completa de los resultados, los cuadros que resumen los coeficientes de determinación, valores de AIC, pendientes y niveles de significancia estadística se presentan en la sección de **Anexos** de esta tesis, donde pueden consultarse de manera detallada.

7.2. Efecto de los tratamientos térmicos en el rendimiento

LOS RESULTADOS muestran que el rendimiento del jarabe de aguamiel osciló entre 7.40 % y 15.50 %, con un promedio general de 11.9 ± 2.9 % (Tabla 7.1). La variabilidad observada puede atribuirse a factores como la composición inicial del aguamiel, el tratamiento térmico aplicado y las condiciones operativas (tiempo de concentración y temperatura).

Los tratamientos con rampa térmica (100-90 °C; series 5 y 6) tendieron a mostrar mayores rendimientos, alcanzando hasta 15.5 %. Este comportamiento sugiere que un descenso progresivo de la temperatura, una vez alcanzado un cierto nivel de concentración, podría favorecer una evaporación más eficiente y, por ende, mejorar la recuperación de sólidos solubles. Sin embargo, esta hipótesis debe ser confirmada mediante ensayos más controlados y un análisis estadístico más robusto que permita establecer diferencias significativas entre tratamientos.

Finalmente, es importante considerar que el aguamiel posee un alto contenido de agua (80-90 %), por lo que se espera una reducción significativa de la masa durante el proceso de concentración. Así, la obtención de

un jarabe con aproximadamente 70 °Brix y rendimientos promedio en torno al 12% resulta coherente con la naturaleza de la materia prima y los objetivos de estandarización del producto. La literatura reciente sobre el procesamiento térmico de líquidos ricos en azúcares, como jarabes, miel y aguamiel, muestra que la elección del perfil de calentamiento influye directamente en la eficiencia de evaporación y en la recuperación de sólidos solubles (Hernández-Ramos et al., 2020). Los estudios comparan tratamientos a temperatura constante con protocolos escalonados o descendentes, señalando que estos últimos favorecen una concentración más eficiente al reducir el riesgo de sobrecalentamiento y preservar compuestos de interés en el producto final (García et al., 2022). Además, las investigaciones destacan que la composición inicial de la materia prima, particularmente el contenido de humedad y la proporción de azúcares, condiciona la cantidad de jarabe recuperado tras la concentración, lo que refuerza la necesidad de adaptar las condiciones de procesamiento a las características de cada lote (Chiodza & Goosen, 2024). La implementación de perfiles térmicos controlados, junto con un monitoreo preciso de °Brix, permite optimizar la relación entre eficiencia energética, rendimiento y calidad final del producto, favoreciendo la estandarización de procesos en la industria de endulzantes naturales.

Tabla 7.1: Rendimiento del jarabe de aguamiel bajo distintos tratamientos térmicos

Serie	Tratamiento térmico	Volumen inicial (kg)	Volumen final (kg)	Rendimiento (%)
1	100 °C	18.495	2.155	11.7
2	100 °C	20.540	1.513	7.4
3	90 °C	17.960	2.050	11.4
4	90 °C	20.115	2.925	14.5
5	100-90 °C	22.045	3.415	15.5
6	100-90 °C	22.875	2.535	11.1
Promedio	–	–	–	11.9 ± 2.9

7.3. Determinación de azúcares

El análisis del perfil de azúcares en los jarabes obtenidos bajo diferentes tratamientos térmicos mostró variaciones importantes en la composición final, evidenciando el impacto de la temperatura y del esquema de calentamiento sobre la hidrólisis de sacarosa y la formación de azúcares reductores (Tabla 7.2). En los jarabes procesados a 100 °C, el contenido de sacarosa fue considerablemente más alto (63.74 ± 2.10 g/100 g) en comparación con los obtenidos a 90 °C (36.50 ± 3.43 g/100 g) y bajo rampa 100-90 °C (35.37 ± 4.09 g/100 g), lo que sugiere que un menor tiempo de residencia para llegar a los 70°Brix habría limitado la hidrólisis de sacarosa y enzimática, así como a una menor disponibilidad de agua libre en las etapas finales del proceso de concentración.

Por el contrario, las condiciones de 90 °C y rampa 100-90 °C promovieron una mayor conversión de sacarosa en glucosa y fructosa, reflejada en el incremento de glucosa (12.17 ± 0.60 g/100 g a 90 °C y 14.59 ± 0.32 g/100 g en rampa) y fructosa (16.14 ± 1.05 g/100 g a 90 °C y 20.10 ± 0.81 g/100 g en rampa). Este comportamiento podría atribuirse a tiempos de exposición prolongados en un rango térmico que facilita la hidrólisis parcial de la sacarosa, fenómeno descrito previamente en productos con alto contenido de azúcares sometidos a tratamientos térmicos controlados (Hernández-Ramos et al., 2020).

Los fructanos también mostraron diferencias entre tratamientos: su concentración fue mayor bajo rampa 100-90 °C (3.77 ± 0.14 g/100 g) y menor a 100 °C (1.78 ± 0.03 g/100 g). Esto indica que temperaturas intermedias y tiempos de calentamiento moderados podrían favorecer la conservación parcial de compuestos funcionales, mientras que temperaturas más altas provocan su degradación acelerada.

La variación en la composición de azúcares se relaciona directamente con los rendimientos obtenidos. Los jarabes elaborados bajo rampa térmica mostraron los valores de rendimiento más altos (15.5%), lo que podría asociarse a un balance adecuado entre evaporación controlada y preservación de sólidos solubles, incluidos azúcares simples y compuestos de mayor complejidad. En contraste, los jarabes procesados a 100 °C registraron los rendimientos más bajos (7.4-11.7%) y un contenido reducido de glucosa y de fructosa, lo que

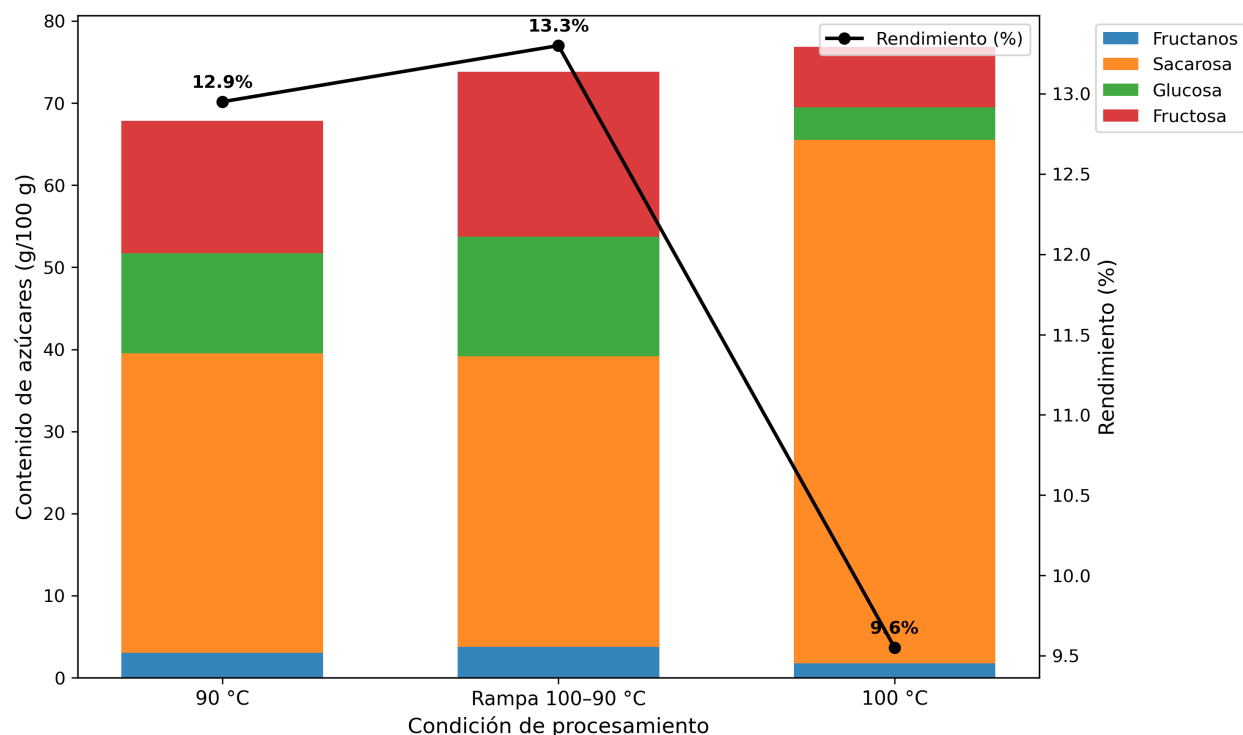


Figura 7.7: Perfil de azúcares y rendimiento bajo diferentes tratamientos térmicos

sugiere que la exposición prolongada a temperaturas elevadas podría promover la degradación térmica de ciertos compuestos.

Tabla 7.2: Contenido de azúcares (g/100 g de jarabe) determinados por HPLC en jarabes de aguamiel obtenidos bajo diferentes condiciones de procesamiento térmico (media \pm desviación estándar)

Condición	Fructanos (g/100g)	Sacarosa (g/100g)	Glucosa (g/100g)	Fructosa (g/100g)	Total azúcares (g/100g)
Jarabe de aguamiel 90 °C	3.04 \pm 0.25	36.50 \pm 3.43	12.17 \pm 0.60	16.14 \pm 1.05	67.86 \pm 5.33
Jarabe de aguamiel rampa 100 a 90 °C	3.77 \pm 0.14	35.37 \pm 4.09	14.59 \pm 0.32	20.10 \pm 0.81	73.83 \pm 5.36
Jarabe de aguamiel 100 °C	1.78 \pm 0.03	63.74 \pm 2.10	3.97 \pm 0.16	7.35 \pm 0.37	76.85 \pm 1.55

Estos resultados se ilustran de forma integrada en la Figura 7.7, donde se observa cómo las variaciones en el perfil de azúcares se relacionan con los cambios en el rendimiento bajo cada tratamiento térmico. Este comportamiento coincide con reportes previos que describen que las estrategias de calentamiento escalonado permiten optimizar simultáneamente el rendimiento y la calidad del jarabe, preservando azúcares simples y compuestos funcionales, además de mejorar la eficiencia energética del proceso (García et al., 2022). En conjunto, la implementación de perfiles térmicos controlados representa una alternativa viable para obtener productos de mayor valor nutricional, con estabilidad composicional y un mejor aprovechamiento de la materia prima.

La evidencia disponible respalda que la optimización de los tratamientos térmicos resulta determinante para modular el perfil de azúcares y maximizar el rendimiento en productos derivados de líquidos ricos en carbohidratos, como el aguamiel. Se ha demostrado que los perfiles de calentamiento escalonados reducen la degradación de azúcares en comparación con tratamientos a temperatura constante, favoreciendo una mayor

recuperación de azúcares reductores y un aprovechamiento más eficiente de la materia prima (Muharja et al., 2022). No obstante, el aumento excesivo de la temperatura o la prolongación de los tiempos de exposición puede inducir la formación de compuestos de degradación, como furfural e hidroximetilfurfural, que afectan negativamente tanto el rendimiento final como la calidad del producto (Pattnaik et al., 2022). En ese sentido, la aplicación de tecnologías analíticas como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) permite caracterizar los cambios en la composición de azúcares y ajustar los perfiles térmicos para lograr un balance entre evaporación controlada y preservación de compuestos funcionales (Cebin et al., 2022). Aplicar estrategias de calentamiento con un monitoreo constante de los perfiles de azúcares mejora la producción de jarabes con un valor nutricional elevado y calidad estandarizada.

Este análisis refuerza la eficacia de los tratamientos en rampa para obtener los mejores rendimientos, con evaporación eficiente y conservación parcial de los compuestos funcionales. El ajuste de rampas térmicas ofrece un marco sólido para mejorar la competitividad y la aceptación del jarabe de aguamiel como endulzante natural en la industria alimentaria.

7.4. Modelado cinético de parámetros fisicoquímicos

El análisis cinético de los atributos fisicoquímicos de calidad permite describir y predecir los cambios que ocurren en el jarabe de aguamiel durante el proceso de concentración térmica. Es por eso que, al evaluar la evolución de variables como los sólidos solubles, el espacio de color, el pH y la acidez titulable total (ATT) bajo diferentes condiciones de tratamiento, permitió identificar el modelo matemático que mejor representa su comportamiento, estimar las constantes de velocidad asociadas y comprender los mecanismos que regulan dichas transformaciones. Este flujo de trabajo proporcionó una base cuantitativa para optimizar las condiciones de procesamiento y favorecer la estandarización del producto final.

7.5. Modelado predictivo de °Brix a partir de parámetros de color

La predicción de los sólidos solubles (°Brix) a partir de los parámetros de color CIE-Lab (L , a , b^*) mostró un desempeño consistente en ambos enfoques evaluados, regresión lineal múltiple y mínimos cuadrados parciales (PLS). Los dos modelos alcanzaron un coeficiente de determinación global de 0.872, con valores de error similares (RMSE \approx 7.17 °Brix y MAE \approx 4.70 °Brix). Este resultado indica que los cambios cromáticos registrados durante la concentración del aguamiel explican de manera robusta la variabilidad en el contenido de sólidos solubles. No obstante, el modelo PLS con tres componentes latentes se consideró más adecuado debido a su capacidad para manejar colinealidad entre los predictores y condensar la información en un espacio reducido de variables, lo que aporta estabilidad y mayor interpretabilidad bajo ciertas condiciones experimentales.

La Tabla 7.3 resume los principales indicadores de desempeño obtenidos para los modelos ajustados. Se observa que ambos modelos alcanzaron métricas idénticas en términos de ajuste global, aunque la diferencia radica en la estructura interna del modelo, lo que hace que el PLS sea más recomendable para este tipo de datos multivariados.

Tabla 7.3: Comparación del desempeño de los modelos predictivos de °Brix a partir de parámetros de color CIE-Lab (L^* , a^* , b^*).

Modelo	R^2	RMSE	MAE	Ecuación / Coeficientes principales
PLS (3 componentes)	0.8721	7.1654	4.7031	L^* : 0.3570; a^* : 14.1442; b^* : 5.7298
Regresión lineal múltiple	0.8721	7.1654	4.7031	$\hat{y} = 26.8316 + (1.7751 \cdot L^*) + (12.5386 \cdot a^*) + (8.4636 \cdot b^*)$

Al analizar los coeficientes de los modelos, se observó que los parámetros a^* y b^* aportaron un mayor peso en la predicción del °Brix en comparación con L . En el caso del modelo PLS, el coeficiente de a fue de 14.14 y el de b^* de 5.73, mientras que el de L^* apenas alcanzó 0.36. Esto concuerda con el hecho de que

durante el tratamiento térmico los cambios hacia tonalidades rojizas y amarillas, asociados con reacciones de caramelización y Maillard, son más informativos para el seguimiento de la concentración de azúcares que las variaciones en luminosidad. De manera similar, en la regresión lineal múltiple los coeficientes más altos correspondieron también a a^* y b^* , confirmando la relevancia de estos predictores cromáticos para describir el avance del proceso.

Cuando los modelos se evaluaron por condición térmica, se evidenció un comportamiento diferenciado. En la condición de 90 °C, el modelo PLS alcanzó un R^2 de 0.929, lo que sugiere una relación altamente consistente entre el color y el contenido de sólidos solubles bajo un calentamiento estable y menos agresivo. En la condición de 100 °C, el desempeño fue igualmente alto ($R^2 = 0.903$), aunque con un ligero descenso, probablemente relacionado con la intensificación de reacciones no lineales en el color, que reducen la predictibilidad. En contraste, el ajuste disminuyó notablemente en la condición de rampa (100-90 °C), donde el modelo alcanzó un R^2 de 0.782. Esta caída en el poder predictivo puede atribuirse a la variabilidad introducida por el cambio de temperatura, que genera dinámicas más heterogéneas tanto en la evolución del color como en la concentración de sólidos, dificultando el establecimiento de un patrón lineal estable.

Los resultados confirman que los parámetros cromáticos constituyen indicadores confiables del °Brix durante la concentración del aguamiel, especialmente cuando las condiciones térmicas son estables. La metodología implementada, con validación cruzada por series, garantiza que el modelo tenga capacidad de generalización y no dependa de un lote específico de materia prima. La selección de PLS como modelo final resulta adecuada por su desempeño equivalente al de la regresión lineal y por su robustez frente a colinealidad y su flexibilidad en el manejo de estructuras de datos complejas. Sin embargo, la reducción del ajuste en la condición de rampa sugiere que para escenarios de mayor variabilidad podrían explorarse modelos no lineales o híbridos, que capten de manera más precisa las interacciones entre color y concentración de azúcares bajo dinámicas de calentamiento no constantes.

La Figura 7.12 muestra una regresión lineal múltiple que alcanzó un coeficiente de determinación de 0.872, con dispersión relativamente homogénea alrededor de la línea de paridad. Este resultado muestra que la relación entre los parámetros cromáticos y los sólidos solubles puede describirse de manera efectiva mediante un modelo lineal, aunque con ligeras desviaciones en los valores extremos de °Brix.

Bajo la condición de 90 °C, el modelo PLS alcanzó el mayor nivel de precisión ($R^2 = 0.929$). La alineación estrecha de los puntos respecto a la línea de paridad indica que el calentamiento moderado y constante favoreció una relación estable entre el color y el °Brix, lo que permitió al modelo realizar predicciones más consistentes (Figura 7.9).

A 100 °C, el ajuste del modelo PLS se mantuvo elevado ($R^2 = 0.903$), aunque con una dispersión ligeramente mayor que a 90 °C. Este comportamiento refleja que la intensidad térmica incrementa la complejidad de los cambios cromáticos asociados a reacciones no lineales, lo que introduce cierta variabilidad en la predicción (Figura 7.10).

La condición de rampa (100-90 °C) mostró el desempeño más bajo ($R^2 = 0.782$), con una dispersión notable en torno a la línea de paridad. Esto indica que la variabilidad inducida por el cambio de régimen térmico dificultó la modelación lineal de la relación entre color y sólidos solubles, lo que reduce la capacidad predictiva del modelo bajo condiciones dinámicas de procesamiento (Figura 7.11).

El modelo PLS, con tres componentes latentes, presentó un ajuste equivalente al de la regresión lineal ($R^2 = 0.872$), pero con la ventaja de reducir problemas de colinealidad entre las variables predictoras. La distribución de los puntos valida la robustez del enfoque quimiométrico, confirmando su utilidad para capturar la variabilidad asociada a las series evaluadas (Figura 7.8).

Diversos trabajos han documentado la utilidad de los parámetros cromáticos para la predicción de sólidos solubles y la evaluación de calidad en alimentos procesados térmicamente. En vegetales tratados con calor y acidificación, los modelos de regresión lograron describir de manera precisa las variaciones de color y textura, con valores de R^2 y RMSE que respaldan la capacidad de predicción de estas métricas (Zareifard et al., 2015). El uso de enfoques quimiométricos aplicados al análisis espectral en la industria azucarera permitió estimar el contenido de azúcares con altos niveles de ajuste, confirmando el potencial de estas metodologías para predecir °Brix en matrices complejas (Sexton et al., 2018). Investigaciones centradas en la estabilidad térmica de antocianinas resaltaron la relación entre la retención de pigmentos y la preservación de la calidad en productos naturales sometidos a procesamiento térmico (Loypimai et al., 2016), mientras que el estudio de extractos tratados por microondas reforzó el vínculo entre estabilidad del color y calidad nutricional, validando

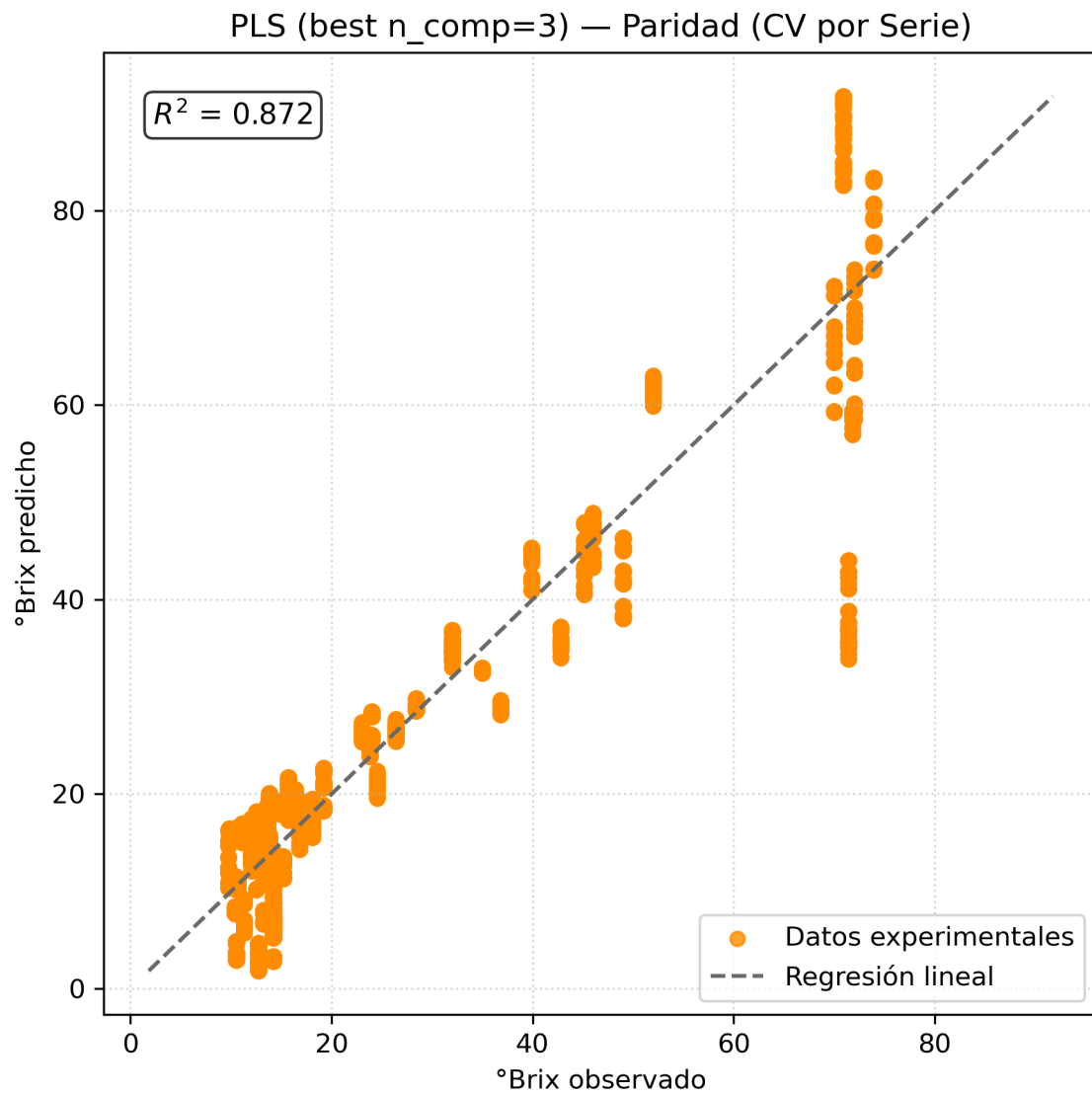


Figura 7.8: Predicción de °Brix mediante mínimos cuadrados parciales (PLS) con tres componentes latentes (validación cruzada por serie)

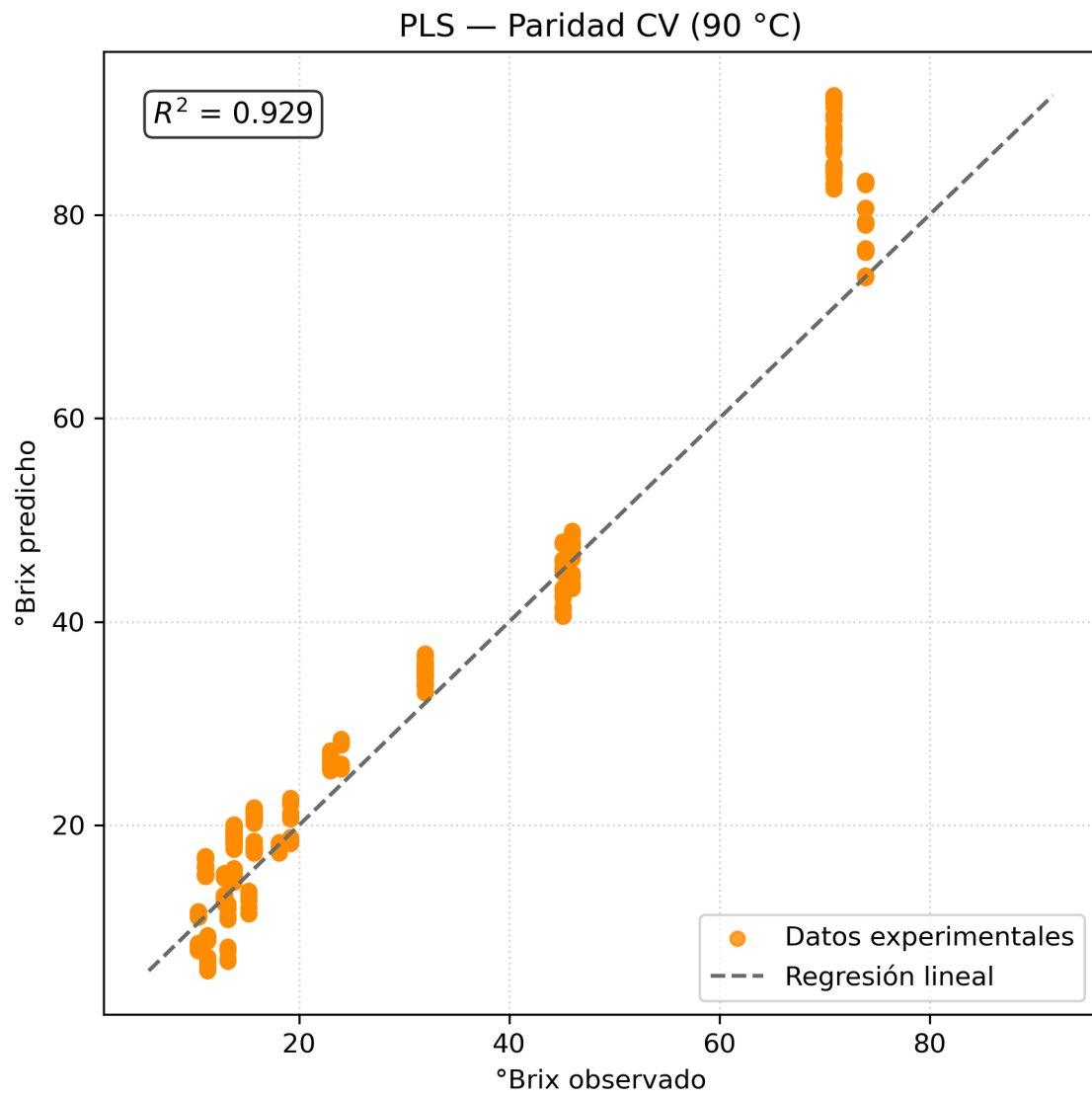


Figura 7.9: Predicción de °Brix con PLS bajo condición térmica de 90 °C

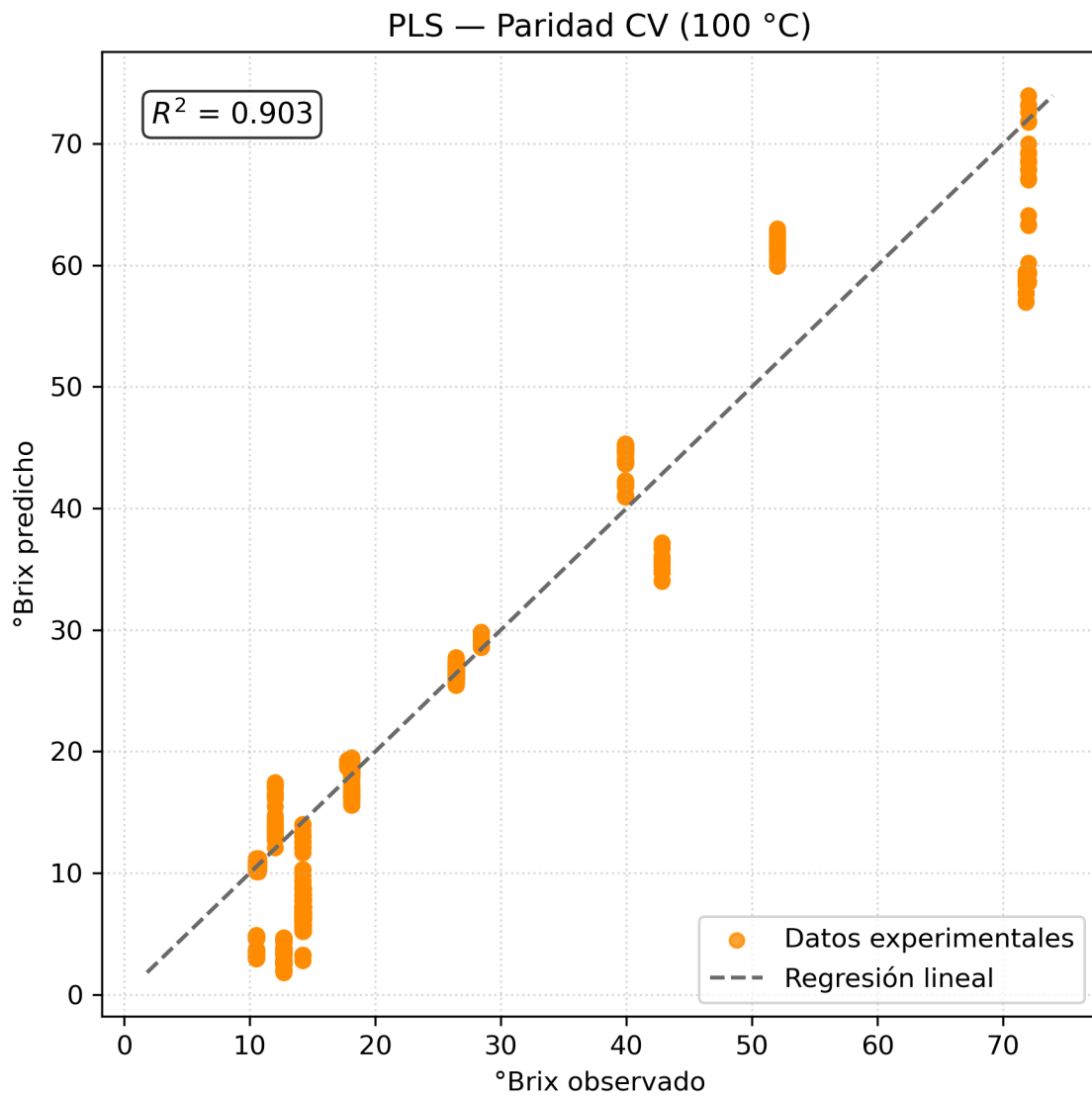


Figura 7.10: Predicción de °Brix con PLS bajo condición térmica de 100 °C

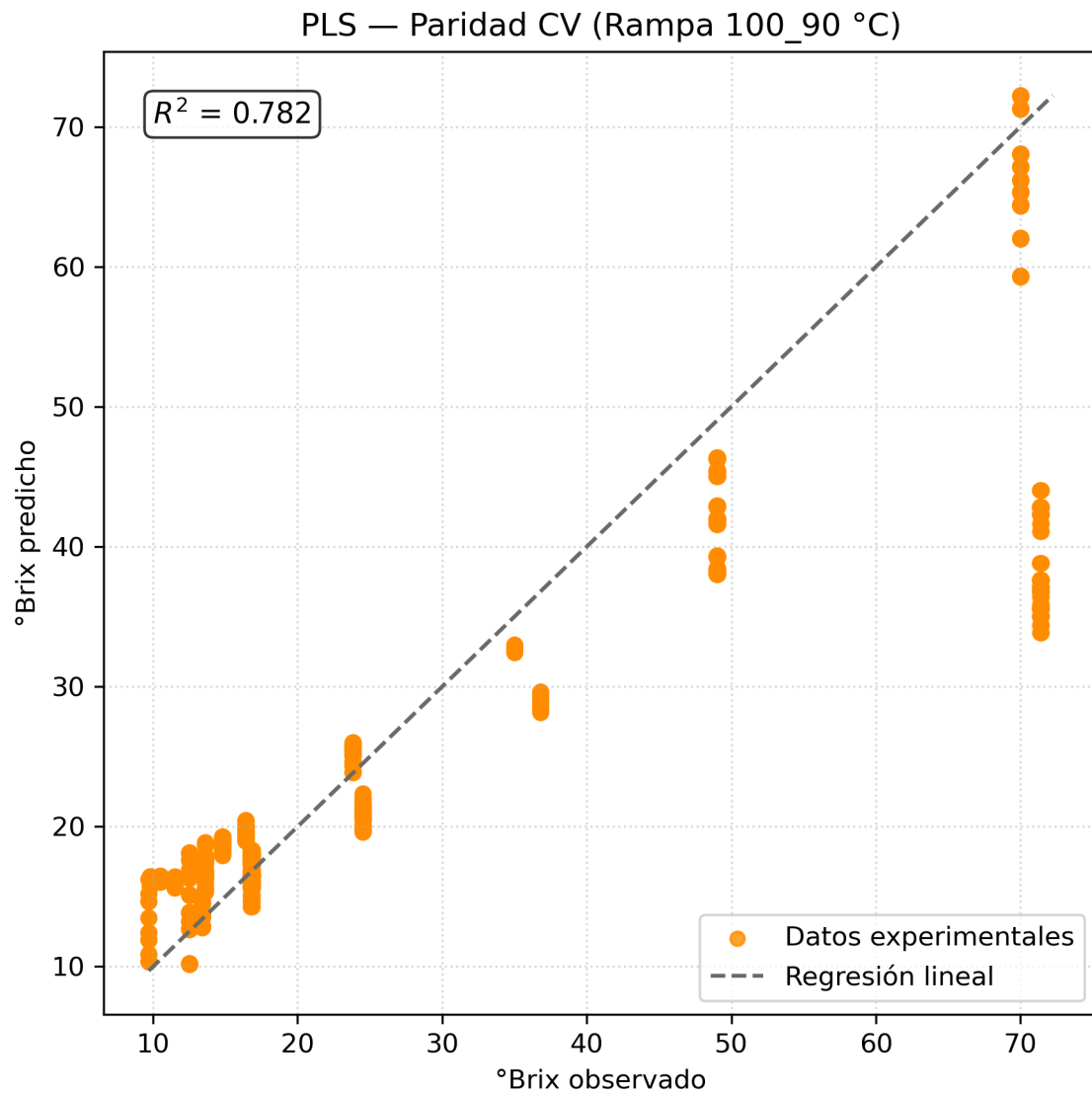


Figura 7.11: Predicción de °Brix con PLS bajo condición de rampa térmica (100-90 °C).

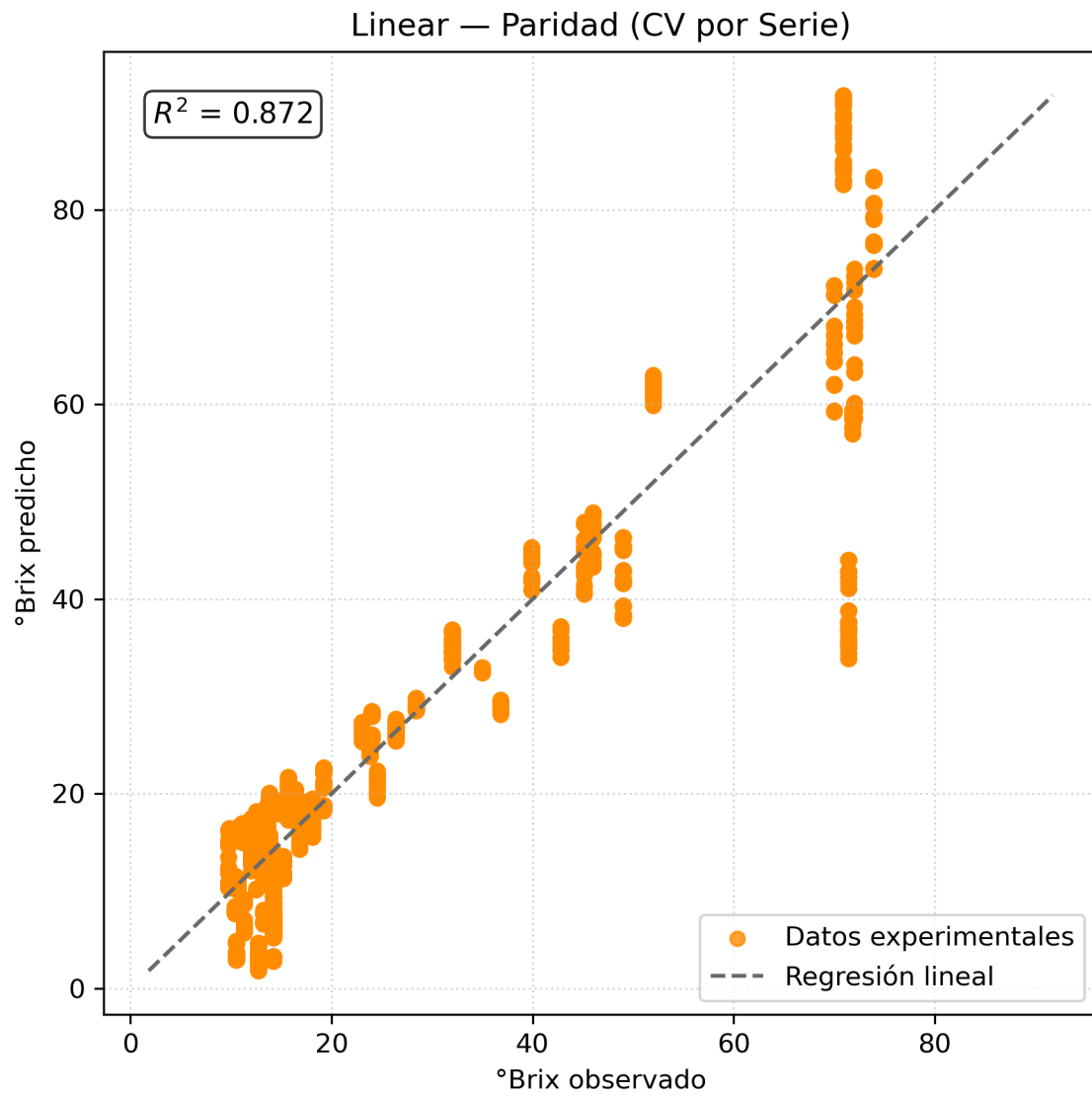


Figura 7.12: Predicción de °Brix mediante regresión lineal múltiple (validación cruzada por serie)

el uso de variables cromáticas como indicadores indirectos de la concentración de azúcares (Barani et al., 2020). Estas evidencias bibliográficas fortalecen la conclusión de que los modelos basados en parámetros de color, como los aplicados en este trabajo, representan herramientas robustas y reproducibles para el monitoreo de °Brix en matrices alimentarias bajo diferentes condiciones térmicas.

La predicción de °Brix a partir de parámetros cromáticos, particularmente a^* y b^* demostró que la colorimetría puede emplearse como un método rápido y no destructivo para el monitoreo en línea. Esto puede servir enormemente para incorporar estrategias de control en tiempo real, lo que sugiere que un cambio visual del karabe sea un indicador fiable de su concentración de sólidos solubles.

Conclusiones y perspectivas

LA PRODUCCIÓN de jarabe de aguamiel bajo condiciones térmicas controladas permitió estandarizar el proceso mediante la evaluación de las variables de tiempo y temperatura. La caracterización inicial del aguamiel estableció una línea base y los tratamientos aplicados condujeron a jarabes con aproximadamente 70 °Brix. Las series analizadas evidenciaron variaciones en el rendimiento, perfil de azúcares, acidez, pH y parámetros de color. En conjunto, el tratamiento en rampa de 100 a 90 °C generó mayores rendimientos y favoreció la conservación de fructanos y azúcares reductores, mientras que los tratamientos isotérmicos a 100 °C se asociaron con mayor retención de sacarosa pero con menor recuperación final. El modelado cinético permitió describir cuantitativamente la evolución de los atributos fisicoquímicos, identificándose ecuaciones de segundo orden para los °Brix, de primer orden para el pH y patrones de orden cero o primer orden para la acidez y el color, según la condición aplicada. Estos resultados confirmaron que los perfiles térmicos controlados favorecieron la reproducibilidad y estabilidad del jarabe.

El estudio demostró que la elección de la estrategia térmica determinó el equilibrio entre eficiencia, estabilidad composicional y calidad sensorial. La integración de los datos de rendimiento, composición de azúcares y predicciones cinéticas sustentó la propuesta de condiciones estandarizadas de procesamiento, con el propósito de reducir la variabilidad y obtener un producto reproducible. Este marco aporta al desarrollo tecnológico del jarabe de aguamiel como edulcorante funcional con potencial nutricional.

En cuanto a perspectivas del estudio, será necesario abordar la escalabilidad del proceso en contextos industriales, evaluar la eficiencia energética e incorporar tecnologías complementarias como la evaporación al vacío o la hidrólisis enzimática para optimizar la producción. Asimismo, deberán considerarse estudios que analicen el efecto de los perfiles térmicos sobre los compuestos bioactivos y la aceptación sensorial, integrando la percepción del consumidor con los hallazgos fisicoquímicos y cinéticos. Estos enfoques contribuirán al diseño de procesos sostenibles y estandarizados que incrementen el valor económico y las propiedades funcionales del jarabe de aguamiel.

A.1. Modelado cinético de los atributos de calidad del aguamiel

LOS ANEXOS presentan un compendio de las métricas de ajuste obtenidas en los modelos cinéticos aplicados a cada uno de los atributos evaluados en el aguamiel durante el procesamiento térmico. Se incluyen los parámetros relacionados con los sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix), el pH, la acidez titulable total (ATT) y los valores de color en el espacio CIE-L*a*b* (L^* , a^* y b^*) en las tablas A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 y A.6 respectivamente. Cada tabla muestra, para las diferentes condiciones y series experimentales, los coeficientes de determinación (R^2 y R^2 ajustado), los valores de sigma, los criterios de información de Akaike (AIC), así como los interceptos, pendientes y niveles de significancia estadística asociados. Estos resultados permiten identificar qué modelos (orden cero, primero o segundo) describen de mejor manera el comportamiento de cada atributo bajo los distintos regímenes de temperatura, ofreciendo una base cuantitativa para la interpretación de los cambios fisicoquímicos observados en el aguamiel procesado térmicamente.

Tabla A.1: Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados a los sólidos solubles del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{adj}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100 °C	1	0	0.8655	0.8319	9.634	47.778	-10.332	11.686	0.31346	0.00711
100 °C	1	1	0.9778	0.9723	0.1246	-4.398	1.799	0.3956	0.00010	0.00019
100 °C	1	2	0.9729	0.9661	0.0060	-	0.1113	-0.0172	0.00004	0.00028
						40.769				
100 °C	2	0	0.8304	0.8062	9.427	69.663	-6.733	7.124	0.35832	0.00063
100 °C	2	1	0.9421	0.9338	0.1768	-1.907	1.925	0.2436	0.00000	0.00001
100 °C	2	2	0.9749	0.9714	0.0049	-	0.1040	-0.0105	0.00000	0.00000
						66.432				
90 °C	3	0	0.7294	0.6843	12.47	66.774	-8.277	7.737	0.42697	0.00695
90 °C	3	1	0.9025	0.8863	0.2347	3.210	1.825	0.2699	0.00006	0.00030
90 °C	3	2	0.9920	0.9907	0.0029	-	0.1119	-0.0122	0.00000	0.00000
						67.111				
90 °C	4	0	0.7700	0.7371	10.19	71.071	-4.797	6.370	0.53778	0.00188
90 °C	4	1	0.9275	0.9171	0.1815	-1.442	1.995	0.2216	0.00000	0.00003
90 °C	4	2	0.9941	0.9932	0.0022	-	0.1000	-0.0096	0.00000	0.00000
						81.170				
100-90 °C	5	0	0.7231	0.6678	12.33	58.679	-6.627	8.421	0.55280	0.01532

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{adj}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100-90 °C	5	1	0.8923	0.8708	0.2340	3.178	1.953	0.2847	0.00018	0.00134
100-90 °C	5	2	0.9815	0.9778	0.0039	-	0.1011	-0.0121	0.00000	0.00002
100-90 °C	6	0	0.7721	0.7436	10.33	78.842	-7.539	5.918	0.31640	0.00082
100-90 °C	6	1	0.9165	0.9061	0.2185	1.732	1.729	0.2255	0.00000	0.00001
100-90 °C	6	2	0.9771	0.9742	0.0055	-	0.1232	-0.0111	0.00000	0.00000
						72.054				

Tabla A.2: Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al pH del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100 °C	1	0	0.066	-0.168	0.978	20.329	7.914	-0.124	0.0010	0.6245
100 °C	1	1	0.058	-0.178	0.131	-3.813	2.060	-0.015	0.00007	0.6467
100 °C	1	2	0.050	-0.188	0.018	-	0.129	0.002	0.0014	0.6707
						27.883				
100 °C	2	0	0.039	-0.099	0.738	23.800	6.715	0.051	<0.00001	0.6119
100 °C	2	1	0.045	-0.091	0.100	-	1.900	0.007	<0.00001	0.5826
						12.189				
100 °C	2	2	0.053	-0.082	0.014	-	0.150	-0.001	0.000001	0.5512
						47.976				
90 °C	3	0	0.132	-0.013	0.717	21.074	7.562	-0.105	<0.00001	0.3771
90 °C	3	1	0.142	-0.001	0.102	-	2.024	-0.016	<0.000001	0.3580
						10.129				
90 °C	3	2	0.152	0.011	0.015	-	0.132	0.002	0.000025	0.3390
						41.233				
90 °C	4	0	0.780	0.749	0.036	-	4.128	0.023	<0.00001	0.0016
						30.569				
90 °C	4	1	0.779	0.747	0.009	-	1.418	0.005	<0.00001	0.0016
						56.399				
90 °C	4	2	0.777	0.745	0.002	-	0.242	-0.001	<0.00001	0.0017
						82.221				
100-90 °C	5	0	0.080	-0.104	0.095	-9.396	3.939	0.012	<0.00001	0.5380
100-90 °C	5	1	0.082	-0.102	0.024	-	1.371	0.003	<0.00001	0.5342
						28.797				
100-90 °C	5	2	0.083	-0.100	0.006	-	0.254	-0.001	<0.00001	0.5304
						48.195				
100-90 °C	6	0	0.814	0.790	0.043	-	4.045	0.028	<0.00001	0.0004
						30.608				
100-90 °C	6	1	0.809	0.785	0.011	-	1.398	0.007	<0.00001	0.0004
						58.873				
100-90 °C	6	2	0.803	0.779	0.003	-	0.247	-0.002	<0.00001	0.0004
						87.120				

Tabla A.3: Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados a la acidez titulable total (ATT) del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100 °C	1	0	0.376	0.220	0.110	-5.932	-0.064	0.041	0.5640	0.1952
100 °C	1	1	0.283	0.104	1.251	23.279	-4.685	0.376	0.0158	0.2775
100 °C	1	2	0.201	0.002	42.08	65.469	84.01	-10.10	0.0986	0.3720
100 °C	2	0	0.528	0.460	0.032	-	0.0034	0.0117	0.8888	0.0267
						32.457				
100 °C	2	1	0.487	0.413	0.509	17.139	-3.835	0.169	<0.0001	0.0367
100 °C	2	2	0.416	0.332	10.81	72.127	39.18	-3.113	0.0016	0.0609
90 °C	3	0	0.536	0.459	0.032	-	-0.0079	0.0131	0.7649	0.0388
						28.530				
90 °C	3	1	0.492	0.407	0.533	16.345	-4.107	0.198	<0.0001	0.0526
90 °C	3	2	0.348	0.239	13.27	67.773	45.96	-3.661	0.0044	0.1240
90 °C	4	0	0.357	0.265	0.058	-	0.0974	0.0148	0.0543	0.0895
						21.943				
90 °C	4	1	0.384	0.296	0.289	6.951	-2.212	0.078	<0.0001	0.0752
90 °C	4	2	0.402	0.317	1.579	37.503	8.699	-0.443	<0.0001	0.0665
100-90 °C	5	0	0.804	0.765	0.067	-	0.0385	0.0575	0.5285	0.0063
						14.284				
100-90 °C	5	1	0.852	0.823	0.198	0.847	-2.220	0.201	<0.0001	0.0030
100-90 °C	5	2	0.844	0.812	0.793	20.260	7.600	-0.778	<0.0001	0.0035
100-90 °C	6	0	0.762	0.732	0.070	-	0.0427	0.0390	0.3981	0.0010
						21.023				
100-90 °C	6	1	0.779	0.751	0.238	3.463	-2.232	0.139	<0.0001	0.0007
100-90 °C	6	2	0.764	0.734	0.976	31.670	7.756	-0.547	<0.0001	0.0009

Tabla A.4: Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al valor L* del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100 °C	1	0	0.541	0.426	8.052	45.625	62.028	-4.177	0.0012	0.0958
100 °C	1	1	0.598	0.498	0.154	-1.873	4.1527	-0.0897	8.41×10^{-06}	0.0712
100 °C	1	2	0.647	0.558	0.003	-	0.0150	0.0020	0.0061	0.0538
						48.918				
100 °C	2	0	0.766	0.732	7.495	65.535	84.323	-4.628	1.13×10^{-06}	0.0020
100 °C	2	1	0.770	0.737	0.120	-8.922	4.4633	-0.0748	2.8×10^{-10}	0.0019
100 °C	2	2	0.763	0.729	0.002	-	0.0110	0.0012	0.0001	0.0021
						82.473				
90 °C	3	0	0.881	0.861	3.213	45.078	75.144	-3.299	9.07×10^{-08}	0.0006

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
90 °C	3	1	0.879	0.859	0.054	-	4.3367	-0.0548	5.43×10^{-11}	0.0006
90 °C	3	2	0.873	0.852	0.001	-	0.0128	0.0009	2.09×10^{-06}	0.0007
90 °C	4	0	0.576	0.515	5.728	60.696	70.297	-2.279	6.24×10^{-07}	0.0178
90 °C	4	1	0.577	0.516	0.104	-	4.2743	-0.0416	1.45×10^{-10}	0.0176
90 °C	4	2	0.569	0.507	0.002	-	0.0135	0.0008	3.08×10^{-05}	0.0189
100-90 °C	5	0	0.730	0.676	3.854	42.396	64.135	-2.679	6.24×10^{-06}	0.0143
100-90 °C	5	1	0.743	0.691	0.073	-	4.1803	-0.0523	1.32×10^{-08}	0.0127
100-90 °C	5	2	0.748	0.698	0.001	-	0.0149	0.0010	5.96×10^{-05}	0.0120
100-90 °C	6	0	0.071	-0.045	6.438	69.390	56.997	-0.555	1.19×10^{-06}	0.456
100-90 °C	6	1	0.094	-0.019	0.126	-9.288	4.0509	-0.0127	4.58×10^{-11}	0.388
100-90 °C	6	2	0.118	0.008	0.003	-	0.0172	0.0003	8.63×10^{-06}	0.330

Tabla A.5: Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al valor a^* del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100 °C	1	0	0.837	0.796	1.703	26.986	-0.951	1.846	0.5811	0.0105
100 °C	1	1	0.947	0.934	0.162	-1.216	0.379	0.329	0.0662	0.0011
100 °C	1	2	0.956	0.945	0.032	-	0.499	-0.071	7.25×10^{-05}	0.00073
100 °C	2	0	0.875	0.857	1.351	34.692	-1.484	1.220	0.174	0.00021
100 °C	2	1	0.972	0.968	0.141	-5.992	-0.161	0.283	0.160	1.09×10^{-06}
100 °C	2	2	0.966	0.961	0.048	-	0.800	-0.087	7.57×10^{-08}	2.16×10^{-06}
90 °C	3	0	0.736	0.692	1.950	37.090	-1.161	1.230	0.474	0.00645
90 °C	3	1	0.884	0.864	0.251	4.255	0.076	0.261	0.709	0.00052
90 °C	3	2	0.919	0.906	0.055	-	0.656	-0.070	4.97×10^{-06}	0.00017
90 °C	4	0	0.616	0.561	2.485	45.660	-0.297	1.074	0.874	0.0123
90 °C	4	1	0.771	0.738	0.288	6.860	0.554	0.180	0.0329	0.00184
90 °C	4	2	0.828	0.804	0.049	-	0.447	-0.037	4.95×10^{-06}	0.00066
100-90 °C	5	0	0.676	0.611	0.941	22.652	2.004	0.574	0.0531	0.0232
100-90 °C	5	1	0.712	0.655	0.179	-0.600	0.940	0.119	0.00156	0.0170
100-90 °C	5	2	0.737	0.684	0.036	-	0.354	-0.026	8.63×10^{-05}	0.0134

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100-90 °C	6	0	0.605	0.555	1.919	45.178	0.387	0.739	0.775	0.00810
100-90 °C	6	1	0.732	0.699	0.272	6.116	0.591	0.140	0.0130	0.00159
100-90 °C	6	2	0.770	0.741	0.055	-25.965	0.452	-0.031	2.02×10^{-06}	0.00085

Tabla A.6: Resumen de métricas de ajuste para los modelos cinéticos aplicados al valor b^* del aguamiel durante el procesamiento térmico, bajo diferentes condiciones y series experimentales.

Condición	Serie	Orden	R^2	R^2_{ajust}	Sigma	AIC	Intercepto	Pendiente	p_intercept	p_slope
100 °C	1	0	0.932	0.915	1.367	24.344	1.787	2.415	0.233	0.00179
100 °C	1	1	0.929	0.912	0.152	-2.026	1.304	0.263	0.00077	0.00192
100 °C	1	2	0.885	0.856	0.024	-24.054	0.233	-0.032	0.00049	0.00515
100 °C	2	0	0.885	0.868	3.405	51.336	-5.070	3.221	0.0796	0.00016
100 °C	2	1	0.958	0.951	0.201	0.436	0.413	0.327	0.0256	4.69×10^{-06}
100 °C	2	2	0.930	0.920	0.038	-29.589	0.416	-0.047	1.37×10^{-06}	2.71×10^{-05}
90 °C	3	0	0.802	0.769	4.898	51.823	-6.180	3.724	0.157	0.00264
90 °C	3	1	0.961	0.955	0.202	0.835	0.251	0.381	0.162	1.83×10^{-05}
90 °C	3	2	0.865	0.843	0.063	-17.775	0.470	-0.061	7.53×10^{-05}	0.00081
90 °C	4	0	0.868	0.849	2.877	48.300	-1.050	2.520	0.631	0.00026
90 °C	4	1	0.962	0.957	0.127	-7.893	1.182	0.219	4.05×10^{-06}	3.08×10^{-06}
90 °C	4	2	0.965	0.960	0.013	-49.210	0.234	-0.023	3.96×10^{-08}	2.38×10^{-06}
100-90 °C	5	0	0.869	0.843	1.404	28.263	2.312	1.530	0.109	0.00220
100-90 °C	5	1	0.928	0.914	0.115	-6.756	1.363	0.175	3.33×10^{-05}	0.00048
100-90 °C	5	2	0.959	0.951	0.011	-40.197	0.221	-0.022	1.98×10^{-06}	0.00012
100-90 °C	6	0	0.822	0.799	3.040	54.381	-1.630	2.032	0.455	0.00030
100-90 °C	6	1	0.920	0.910	0.206	0.504	0.845	0.217	0.00032	1.15×10^{-05}
100-90 °C	6	2	0.926	0.917	0.026	-40.686	0.316	-0.029	1.08×10^{-07}	8.30×10^{-06}

Referencias

- Abedi-Firoozjah, R., Yousefi, S., Heydari, M., Seyedfatehi, F., Jafarzadeh, S., Mohammadi, R., Rouhi, M., & Garavand, F. (2022). Application of Red Cabbage Anthocyanins as pH-Sensitive Pigments in Smart Food Packaging and Sensors. *Polymers*, *14*(8), 1629. <https://doi.org/10.3390/polym14081629>
- Aldana, M. Y., Bustos, Y., Espinoza, L. A., Ramírez, A., Nabarlantz, D. A., Blanco-Tirado, C., & Combariza, M. Y. (2023). Influence of Temperature and pH during Cacao Mucilage Exudate Concentration on Cacao Syrup Composition. *International Journal of Food Science & Technology*, *58*(12), 6817–6824. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16677>
- Ali, A., Chong, C., Mah, S., Abdullah, L., Choong, T., & Chua, B. (2018). Impact of Storage Conditions on the Stability of Predominant Phenolic Constituents and Antioxidant Activity of Dried Piper Betle Extracts. *Molecules*, *23*(2), 484. <https://doi.org/10.3390/molecules23020484>
- Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Hassan, N. A., Didar, Z., Hesarinejad, M. A., Rahman Salama, N. A., Al-Hashimi, A. G., Cacciola, F., & Abedelmaksoud, T. G. (2024). Effects of Microwave Utilization on the Color Properties of Food: A Review. *ChemBioEng Reviews*, *11*(3), 483–494. <https://doi.org/10.1002/cben.202300067>
- Álvarez-Ríos, G. D., Vallejo, M., Figueredo-Urbina, C. J., & Estremo, S. (2022). *Agaves Pulqueros de México*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30667.05928>
- Arvizu-Castro, D. E., Rodríguez, C. G., Montes, G. N., Alemán, C. S. J., Soler, M. A., Montes, G. N., & Téllez, L. S. (2016). Determinación y Cuantificación de Azúcares Totales En Jarabes de Sorgo Dulce RB-Cañero y Una Variedad Experimental. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, *1*, 679–684.
- Avila-Lara, D. D., Montemayor, Á.-M. G., Espinoza-Arellano, J. de J., Flores-Gallegos, A. C., & Rodríguez-Herrera, R. (2021). Rentabilidad de la producción de aguamiel en el sureste del estado de Coahuila, México: Un estudio de caso. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, *82*, 61–71. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2021822561>
- Barani, Y. H., Zhang, M., Bhandari, B., & Wang, B. (2020). Color Stability and Anthocyanins Retention in Microwave-thermally Treated Rose Powder Extracts during Storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*(10). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14727>
- Bett-Garber, K. L., Lea, J. M., Watson, M. A., Grimm, C. C., Lloyd, S. W., Beaulieu, J. C., Stein-Chisholm, R. E., Andrzejewski, B. P., & Marshall, D. A. (2015). Flavor of Fresh Blueberry Juice and the Comparison to Amount of Sugars, Acids, Anthocyanidins, and Physicochemical Measurements. *Journal of Food Science*, *80*(4). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12821>
- Braghini, F., Biluca, F. C., Gonzaga, L. V., Kracik, A. S., Vieira, C. R. W., Vitali, L., Micke, G. A., Costa, A. C. O., & Fett, R. (2019). Impact of Short-term Thermal Treatment on Stingless Bee Honey (*Meliponinae*) : Quality, Phenolic Compounds and Antioxidant Capacity. *Journal of Food Processing and Preservation*, *43*(7). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13954>

- Buvé, C., Pham, H. T. T., Hendrickx, M., Grauwet, T., & Van Loey, A. (2021). Reaction Pathways and Factors Influencing Nonenzymatic Browning in Shelf-stable Fruit Juices during Storage. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5698–5721. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12850>
- Castañeda-Ovando, A., Moreno-Vilet, L., Jaimez-Ordaz, J., Ramírez-Godínez, J., Pérez-Escalante, E., Cruz-Guerrero, A. E., Contreras-López, E., Alatorre-Santamaría, S. A., Guzmán-Rodríguez, F. J., & González-Olivares, L. G. (2023). Aguamiel Syrup as a Technological Diversification Product: Composition, Bioactivity and Present Panorama. *Future Foods*, 8, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100249>
- Castillo, A. K. M., López, E. C., Flores, J. G. P., Curiel, L. G., Escalante, E. P., Vega, K. S., Ángel-Jijón, C., & Elizarrarás, A. C. (2025). Improving Kinetic Model Fitting for Total Titratable Acidity in Bananas Using Genetic Algorithms. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 19(Especial), e1847–e1847. <https://doi.org/10.54167/tch.v19iEspecial.1847>
- Castro-Díaz, A. S., Cid-Ortega, S., & Guerrero-Beltrán, J. A. (2017). Physicochemical, Microbiological, Antioxidant and Sensory Characteristics of “Aguamiel” Microencapsulated by Spray Drying. *Journal of Food Research*, 6(5).
- Cavaco, T., Figueira, A. C., González-Domínguez, R., Sayago, A., & Fernández-Recamales, Á. (2021). Evolution of Physicochemical Parameters during the Thermal-Based Production of Água-mel, a Traditional Portuguese Honey-Related Food Product. *Molecules*, 27(1), 57. <https://doi.org/10.3390/molecules27010057>
- Cebin, A. V., Komes, D., & Ralet, M.-C. (2022). Development and Validation of HPLC-DAD Method with Pre-Column PMP Derivatization for Monomeric Profile Analysis of Polysaccharides from Agro-Industrial Wastes. *Polymers*, 14(3), 544. <https://doi.org/10.3390/polym14030544>
- Cerón Zamora, C. (2022). *Índice Glucémico in Vitro y Actividad Antioxidante de Jarabe de Agave Obtenido Por Evaporación Rotatoria al Vacío*.
- Chavez, A. Y., Silva, R. J., & Pampa, N. B. (2020). Evaluación Físicoquímica y Sensorial de Galletas Enriquecidas Con Harina de Castaña (Bertholletia Excelsa). *Peruvian Agricultural Research*, 2(1). <https://doi.org/10.51431/par.v2i1.620>
- Chávez-Güitrón, L., Salinas-Pérez, F. D. C., Pérez-Salinas, E. A., Caballero, J., Vallejo-Zamora, A., & Sandoval-Zapotitla, E. (2019). Variación de Caracteres Epidérmico-Foliares de Agave Salmiana Subsp. Salmiana (Asparagaceae) En El Centro de México. *Botanical Sciences*, 97(4), 711–724. <https://doi.org/10.17129/botsci.2159>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The Coefficient of Determination R-squared Is More Informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in Regression Analysis Evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Chiodza, K., & Goosen, N. J. (2024). Influence of Mixing Speed, Solids Concentration and Enzyme Dosage on Dry Solids Yield and Protein Recovery during Enzymatic Hydrolysis of Sardine (Sardina Pilchardus) Processing by-Products Using Alcalase 2.4L: A Multivariable Optimisation Approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(22), 29045–29067. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03829-2>
- Coutiño-Estrada, B., Vidal-Martínez, V. A., Cruz-Gómez, B., & Cruz-Vázquez, C. (2010). APTITUD COMBINATORIA GENERAL Y ESPECÍFICA DEL CONTENIDO DE AZÚCARES EN MAÍCES CRIOLLOS ELOTEROS. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(Especial_4), 57. https://doi.org/10.35196/rfm.2010.Especial_4.57
- Cruz, C. A., Ocampo, C. A. R., Cervantes, L. S., & Angeles, S. V. (2021). Desarrollo de formulaciones de productos de confitería de bajo aporte calórico utilizando aguamiel y alcoholes polihídricos como edulcorantes. *Revista Científica*, 18(1).
- Dankers, C. (2003). The Concepts of Standards, Certification and Labelling. En *Environmental and Social Standards, Certification and Labelling for Cash Crops* (1o ed., Vol. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- de la Rosa, O., Flores-Gallegos, A. C., Muñiz-Márquez, D., Contreras-Esquivel, J. C., Teixeira, J. A., Nobre, C., & Aguilar, C. N. (2022). Successive Fermentation of Aguamiel and Molasses by *Aspergillus Oryzae* and *Saccharomyces Cerevisiae* to Obtain High Purity Fructooligosaccharides. *Foods*, 11(12), 1786. <https://doi.org/10.3390/foods11121786>

- Detudom, R., Deetae, P., Wei, H., Boran, H., Chen, S., Siriamornpun, S., & Prakitchaiwattana, C. (2023). Dynamic Changes in Physicochemical and Microbiological Qualities of Coconut Water during Post-harvest Storage under Different Conditions. *Horticulturae*, 9(12), 1284. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121284>
- Dhungel, P., Hrynets, Y., & Betti, M. (2018). Sous-Vide Nonenzymatic Browning of Glucosamine at Different Temperatures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(17), 4521–4530. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01265>
- Duma, M., Alsina, I., Institute of Soil and Plant sciences, Faculty of Agriculture, Latvia University of Agriculture, Liela iela 2, Jelgava, Latvia, Dubova, L., Institute of Soil and Plant sciences, Faculty of Agriculture, Latvia University of Agriculture, Liela iela 2, Jelgava, Latvia, Erdberga, I., & Institute of Soil and Plant sciences, Faculty of Agriculture, Latvia University of Agriculture, Liela iela 2, Jelgava, Latvia. (2017). Quality of Tomatoes during Storage. *11th Baltic Conference on Food Science and Technology "Food Science and Technology in a Changing World"*, 130–133. <https://doi.org/10.22616/foodbalt.2017.030>
- Farag, M. R., Alagawany, M., Bin-Jumah, M., Othman, S. I., Khafaga, A. F., Shaheen, H. M., Samak, D., Shehata, A. M., Allam, A. A., & Abd El-Hack, M. E. (2020). The Toxicological Aspects of the Heat-Borne Toxicant 5-Hydroxymethylfurfural in Animals: A Review. *Molecules*, 25(8), 1941. <https://doi.org/10.3390/molecules25081941>
- Farrokhi, F., Mizani, M., & Honarvar, M. (2012). Study of Probable Physicochemical Changes during the Storage of Light and Thick Sucrose Syrups. *World Applied Sciences Journal*, 18, 715–721. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.05.3721>
- Figueredo-Urbina, C. J., Arce-Cervantes, O., Castañeda-Ovando, A., Figueredo-Urbina, C. J., Arce-Cervantes, O., & Castañeda-Ovando, A. (2024). Diversidad de agaves utilizados para la producción de jarabe de aguamiel en el estado de Hidalgo, México. *Polibotánica*, 58, 265–290. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.19>
- Franco Malvaiz, A. L., Bobadilla Soto, E. E., & Rebollar Rebollar, S. (2014). VIABILIDAD ECONÓMICA Y FINANCIERA DE UNA MICROEMPRESA DE MIEL DE AGUAMIEL EN MICHOACÁN, MÉXICO. *Revista Mexicana de Agronegocios*. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.204218>
- Fu, Z., Zhao, S., Zhang, X., Polovka, M., & Wang, X. (2019). Quality Characteristics Analysis and Remaining Shelf Life Prediction of Fresh Tibetan Tricholoma Matsutake under Modified Atmosphere Packaging in Cold Chain. *Foods*, 8(4), 136. <https://doi.org/10.3390/foods8040136>
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzahedi, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P., & Bursać Kovačević, D. (2018). Pulsed Electric Fields as an Alternative to Thermal Processing for Preservation of Nutritive and Physicochemical Properties of Beverages: A Review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), e12638. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12638>
- Garber, L. L., Hyatt, E. M., & Nafees, L. (2016). The Effects of Analogous Food Color on Perceived Flavor: A Factorial Investigation. *Journal of Food Products Marketing*, 22(4), 486–500. <https://doi.org/10.1080/10454446.2015.1072866>
- García, F. P., Canales-Flores, R. A., Prieo-Méndez, J., Acevedo-Sandoval, O. A., & Otazo-Sánchez, E. M. (2022). EVALUATION OF THREE LIGNOCELLULOSE BIOMASS MATERIALS (BARLEY HUSK, CORN COBS, AGAVE LEAVES) AS PRECURSORS OF ACTIVATED CARBON. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 11(1), 17–39. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v11n1.97719>
- García-Soto, M. J., Jimenez-Islas, H., Navarrete-Bolanos, J. L., Rico-Martinez, R., Miranda-Lopez, R., & Botello-Alvarez, J. E. (2011). Kinetic Study of the Thermal Hydrolysis of Agave Salmiana for Mezcal Production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7333–7340. <https://doi.org/10.1021/jf200026y>
- Gérard, V., Ay, E., Launay, V., Galopin, C., Morlet-Savary, F., & Lalevée, J. (2022). Improvement of Color Stability Using a Chelating Agent in Model Soft Beverages Subjected to Fenton Reaction. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 69(7), 1096–1105. <https://doi.org/10.1002/jccs.202200164>
- Gomes, J. L., Ribeiro, A. S. C., Kushida, M. M., Kamimura, E. S., Maldonado, R. R., & Petrus, R. R. (2020). Sugarcane Juice Pasteurization: A Search for the Most Effective Parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14842>

- González-Montemayor, Á.-M., Flores-Gallegos, A. C., Serrato-Villegas, L. E., Ruelas-Chacón, X., López, M. G., & Rodríguez-Herrera, R. (2020). Processing Temperature Effect on the Chemical Content of Concentrated Aguamiel Syrups Obtained from Two Different Agave Species. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *14*(3), 1733–1743. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00421-4>
- Grossmann, L., Kinchla, A. J., Nolden, A., & McClements, D. J. (2021). Standardized Methods for Testing the Quality Attributes of Plant-Based Foods: Milk and Cream Alternatives. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *20*(2), 2206–2233. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12718>
- Han, F.-L., Zhang, W.-N., Pan, Q.-H., Zheng, C.-R., Chen, H.-Y., & Duan, C.-Q. (2008). Principal Component Regression Analysis of the Relation Between CIELAB Color and Monomeric Anthocyanins in Young Cabernet Sauvignon Wines. *Molecules*, *13*(11), 2859–2870. <https://doi.org/10.3390/molecules13112859>
- Han, M., Zhao, H., Liu, Z., Liu, J., Liu, X., Hang, F., Li, K., & Xie, C. (2025). Color Development Characteristic and Kinetic Modeling of Maillard Reaction in Membrane-Clarified Sugarcane Juice During Vacuum Evaporation Process. *Foods*, *14*(12), 2136. <https://doi.org/10.3390/foods14122136>
- Hassoun, A., Dankar, I., Bhat, Z., & Bouzembrak, Y. (2024). Unveiling the Relationship between Food Unit Operations and Food Industry 4.0: A Short Review. *Heliyon*, *10*(20), e39388. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39388>
- Hernández-Ramos, L., García-Mateos, R., Ybarra-Moncada, Ma. C., & Colinas-León, M. T. (2020). Nutritional Value and Antioxidant Activity of the Maguey Syrup (Agave Salmiana and A. Mapisaga) Obtained through Three Treatments. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *48*(3), 1306–1316. <https://doi.org/10.15835/nbha48311947>
- Huang, Z., Liu, L., Li, G., Li, H., Ye, D., & Li, X. (2019). Nondestructive Determination of Diastase Activity of Honey Based on Visible and Near-Infrared Spectroscopy. *Molecules*, *24*(7), 1244. <https://doi.org/10.3390/molecules24071244>
- Huezcas-Garrido, L., Alanís-García, E., Ariza-Ortega, J. A., & Zafra-Rojas, Q. Y. (2022). Subproductos de Interés Nutricional y Funcional de Agave Salmiana. *Revista Chilena de Nutrición*, *49*(2), 250–262. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182022000200250>
- Jafari, S. M., guven, E. C., & Karaca, A. C. (2024). *Evaporation Technology in Food Processing: Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. Elsevier.
- Jaimez-Ordaz, J., Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., González-Olivares, L. G., Añorve-Morga, J., & Contreras-López, E. (2019). Kinetic Parameters of Lipid Oxidation in Third Generation (3G) Snacks and Its Influence on Shelf-Life. *Food Science and Technology*, *39*(suppl 1), 136–140. <https://doi.org/10.1590/fst.38917>
- Justo, M. B., Oropeza, L. G., Hernández, R. S., & Negrete, L. P. (2001). Azúcares En Agaves (Agave Tequilana Weber) Cultivados En El Estado de Guanajuato. *Acta universitaria*, *11*(1), 33–38.
- Karadeniz, F., Işık, B., Kaya, S., Aslanali, O., & Midilli, F. (2024). Kinetics of Colour, Clarity Changes and HMF Formation in Pear Juice Concentrate During Storage. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, *11*(3), 589–597. <https://doi.org/10.54287/gujsa.1529814>
- Karahan, D., Yurt, B., & Güven, E. Çapanoğlu. (2023). INVESTIGATION of the EFFECT of CREAMED HONEY PRODUCTION PROCESS on the SUGAR PROFILE of HONEY. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, *12*(2), 76–81. <https://doi.org/10.46810/tdfd.1214059>
- Kay, E. (2020). *A History of British Baking: From Blood Bread to Bake-Off*. Pen and Sword History.
- Khajehei, F., Niakousari, M., Eskandari, M. H., & Sarshar, M. (2015). Production of Pomegranate Juice Concentrate by Complete Block Cryoconcentration Process. *Journal of Food Process Engineering*, *38*(5), 488–498. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12179>
- Khalil, S., Helmy, S., & Sasy, A. (2019). IMPROVEMENT PHEIO-CHEMICAL SENSORY AND MICROBIOLOGICAL CHARACTERS OF SWEET SORGHUM. *Alexandria Journal of Food Science and Technology*, *16*(2), 35–43. <https://doi.org/10.21608/ajfs.2020.14239.1010>
- Klumpers, B., Hensen, E. J. M., & Filot, I. A. W. (2022). Lateral Interactions of Dynamic Adlayer Structures from Artificial Neural Networks. *The Journal of Physical Chemistry C*, *126*(12), 5529–5540. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c10401>
- Kong, I., Lamudji, I. G., Angkowi, K. J., Insani, R. M. S., Mas, M. A., & Pui, L. P. (2023). Application of Edible Film with Asian Plant Extracts as an Innovative Food Packaging: A Review. *Coatings*, *13*(2),

245. <https://doi.org/10.3390/coatings13020245>
- Leal-Díaz, A. M., Santos-Zea, L., Martínez-Escobedo, H. C., Guajardo-Flores, D., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Effect of *Agave Americana* and *Agave Salmiana* Ripeness on Saponin Content from Aguamiel (Agave Sap). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *63*(15), 3924–3930. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00883>
- León Báez, J., & Márquez Pallares, L. (2024). Uso Del Aguamiel Como Edulcorante En Mermeladas a Base de Frutas de La Región de Jalacingo Veracruz: Use of Aguamiel as a Sweetener in Fruit-Based Jam from the Jalacingo Veracruz Region. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *5*(3). <https://doi.org/10.56712/latam.v5i3.2036>
- Li, H., Zhang, W.-C., Tang, X.-Y., Wu, C.-J., Yu, S.-J., & Zhao, Z.-Q. (2021). Identification of Bitter-taste Compounds in class-III Caramel Colours. *Flavour and Fragrance Journal*, *36*(3), 404–411. <https://doi.org/10.1002/ffj.3652>
- Li, W., Gong, Q., Guo, X., Wu, Q., Chang, F., Wang, H., Zhang, F., Hao, E., & Jiao, L. (2021). Synthesis, Reactivity, and Properties of a Class of π -Extended BODIPY Derivatives. *The Journal of Organic Chemistry*, *86*(23), 17110–17118. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.1c02216>
- Loypimai, P., Moongngarm, A., & Chottanom, P. (2016). Thermal and pH Degradation Kinetics of Anthocyanins in Natural Food Colorant Prepared from Black Rice Bran. *Journal of Food Science and Technology*, *53*(1), 461–470. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2002-1>
- Lyu, J., Liu, X., Bi, J., Wu, X., Zhou, L., Ruan, W., Zhou, M., & Jiao, Y. (2018). Kinetic Modelling of Non-Enzymatic Browning and Changes of Physio-Chemical Parameters of Peach Juice during Storage. *Journal of Food Science and Technology*, *55*(3), 1003–1009. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-3013-x>
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2021). General Mathematical and Engineering Principles in Unit Operations of Food Processing. En *Engineering Principles of Unit Operations in Food Processing* (pp. 403–417). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818473-8.00014-1>
- Márquez-Pallares, L., Aguila-Muñoz, J., Honorato-Salazar, J. A., & Trejo-Estrada, S. R. (2024). MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL ANALYSES OF Agave salmiana VARIETIES. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i2.2841>
- Marson, B. M., Concentino, V., Junkert, A. M., Fachi, M. M., Vilhena, R. O., & Pontarolo, R. (2020). Validation of Analytical Methods in a Pharmaceutical Quality System: An Overview Focused on Hplc Methods. *Química Nova*, *43*, 1190–1203. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170589>
- Medina, J. R. V., Valencia, A. F. R., Marín, J. A. P., & Castrillón, Y. U. L. (2024). Thermal Integration in Sugar Production Using Pinch Analysis. *Ingeniería y Competitividad*, *26*(3). <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i3.14315>
- Mellado-Mojica, E., & López-Pérez, M. G. (2013). Análisis comparativo entre jarabe de agave azul (Agave tequilana Weber var. azul) y otros jarabes naturales. *Agrociencia*, *47*(3), 233–244.
- Mendoza, C. M., Cruz, E. I. R., & Jahuey, M. V. (2022). Caracterización Físicoquímica, Microbiológica y Organoléptica Del Aguamiel y Pulque Del Alto Mezquital, Hidalgo. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, *19*(4), 448–462.
- Meng, Y., Cao, Y., Xiong, K., Ma, L., Zhu, W., Long, Z., & Dong, C. (2021). Effect of Cellulose Nanocrystal Addition on the Physicochemical Properties of Hydroxypropyl Guar-Based Intelligent Films. *Membranes*, *11*(4), 242. <https://doi.org/10.3390/membranes11040242>
- Morales, J. M. V., Hernández, M. V., Espinoza, A. D., & Cruz, D. M. A. (2024). Aguamiel y Pulque: Más Que Bebidas Tradicionales. *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, *7*(12), 40–51.
- Moreno-Vilet, L., González-Olivares, L. G., Pérez-Vargas, I., Camacho-Ruiz, R. M., Andrade-González, I., & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2019). Physicochemical Characterization and Carbohydrate Profile of Maguey Syrup and Aguamiel from the State of Hidalgo. En *INTEGRAL AND SUSTAINABLE USE OF AGAVE* (1o ed., Vol. 1, p. 129).
- Muharja, M., Widjaja, A., Darmayanti, R. F., Fadhilah, N., Airlangga, B., Halim, A., Fadilah, S. N., & Arimbawa, I. M. (2022). Subcritical Water Process for Reducing Sugar Production from Biomass: Optimization and Kinetics. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, *17*(4), 839–849. <https://doi.org/10.9767/bcrec.17.4.16527.839-849>

- Muñiz-Márquez, D. B., Contreras, J. C., Rodríguez, R., Mussatto, S. I., Wong-Paz, J. E., Teixeira, J. A., & Aguilar, C. N. (2015). Influence of Thermal Effect on Sugars Composition of Mexican Agave Syrup. *CyTA - Journal of Food*, 1–6. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1028452>
- Nagai, T., Kai, N., Tanoue, Y., & Suzuki, N. (2018). Chemical Properties of Commercially Available Honey Species and the Functional Properties of Caramelization and Maillard Reaction Products Derived from These Honey Species. *Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 586–597. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2968-y>
- Narváez Suárez, A. U., Martínez Saldaña, T., & Jiménez-Velázquez, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola*, 56, 33–44. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2016.56.005>
- Nengsih, T. A., Bertrand, F., Maumy-Bertrand, M., & Meyer, N. (2019). Determining the Number of Components in PLS Regression on Incomplete Data Set. *Statistical Applications in Genetics and Molecular Biology*, 18(6). <https://doi.org/10.1515/sagmb-2018-0059>
- Ng, L. C., Abd Razak, S. B., Rudiyanto, Tan, S. P., & Tufail Ahmad, F. (2023). Low Heating Effects on The Total Microbial Activity and Physico-Chemical Properties of Stingless Bee (Heterotrigona Itama) Honey. *Malaysian Applied Biology*, 52(1), 43–52. <https://doi.org/10.55230/mabjournal.v52i1.2442>
- Noriega-Juárez, A. D., Meza-Espinoza, L., García-Magaña, M. de L., Ortiz-Basurto, R. I., Chacón-López, M. A., Anaya-Esparza, L. M., & Montalvo-González, E. (2025). Aguamiel, a Traditional Mexican Beverage: A Review of Its Nutritional Composition, Health Effects and Conservation. *Foods*, 14(1), 134. <https://doi.org/10.3390/foods14010134>
- Ozuna, C., & Franco-Robles, E. (2022). Agave Syrup: An Alternative to Conventional Sweeteners? A Review of Its Current Technological Applications and Health Effects. *LWT*, 162, 113434. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113434>
- Ozuna, C., Trueba-Vázquez, E., Moraga, G., Llorca, E., & Hernando, I. (2020). Agave Syrup as an Alternative to Sucrose in Muffins: Impacts on Rheological, Microstructural, Physical, and Sensorial Properties. *Foods*, 9(7), 895. <https://doi.org/10.3390/foods9070895>
- Padovan, M., Ares, G., Scapin, T., Kraemer, M. V. D. S., Chaddad, M. C. C., Fernandes, A. C., Bernardo, G. L., Uggioni, P. L., Pettigrew, S., & Proença, R. P. D. C. (2024). Declaration of Free Sugars from Fruits on Food Labels: A Scoping Review. *British Food Journal*, 126(12), 4342–4356. <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2024-0547>
- Park, J.-M., Koh, J.-H., & Kim, J.-M. (2018). Predicting Shelf-Life of Ice Cream by Accelerated Conditions. *Korean journal for food science of animal resources*, 38(6), 1216–1225. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.e55>
- Pattnaik, F., Nanda, S., Kumar, V., Naik, S., Dalai, A. K., & Mohanty, M. K. (2022). Extraction of Sugars and Cellulose Fibers from *Cannabis* Stems by Hydrolysis, Pulping, and Bleaching. *Chemical Engineering & Technology*, 45(5), 962–970. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100517>
- Pereira, C. I., Gomes, E. O., Gomes, A. M. P., & Malcata, F. X. (2008). Proteolysis in Model Portuguese Cheeses: Effects of Rennet and Starter Culture. *Food Chemistry*, 108(3), 862–868. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.050>
- Pereira, C. T. M., De Medeiros, A. C., Ventura, M. B., Pereira, D. M., & Bolini, H. M. A. (2022). Do the Colors of the Label and the Sweetening Agent Information Influence the Sensory Expectations Consumer? A Case Study with Skyr-Type Yogurt. *Foods*, 11(2), 167. <https://doi.org/10.3390/foods11020167>
- Plascencia, A., Gutiérrez-Mora, A., Rodríguez-Domínguez, J. M., Castañeda-Nava, J. J., Gallardo-Valdez, J., Shimada, H., & Camacho-Ruiz, R. M. (2022). Molecular Weight Distribution of Fructans Extracted from Agave Salmiana Leaves. *Botanical Sciences*, 100(3), 657–666. <https://doi.org/10.17129/botsci.2960>
- Porto, M. R. A., Okina, V. S., Pimentel, T. C., Garcia, S., & Prudencio, S. H. (2018). Beet and Orange Mixed Juices Added with *Lactobacillus Acidophilus*. *Nutrition & Food Science*, 48(1), 76–87. <https://doi.org/10.1108/NFS-06-2017-0108>
- Pramitasari, R., Gunawicahya, L. N., & Anugrah, D. S. B. (2022). Development of an Indicator Film Based on Cassava Starch–Chitosan Incorporated with Red Dragon Fruit Peel Anthocyanin Extract. *Polymers*, 14(19), 4142. <https://doi.org/10.3390/polym14194142>

- Provost, J. J., Colabroy, K. L., Kelly, B. S., & Wallert, M. A. (2016). *The Science of Cooking: Understanding the Biology and Chemistry Behind Food and Cooking*. Wiley.
- Purnamasari, L., Dela Cruz, J. F., Kim, C. S., Hwang, S. G., & Yi, J. K. (2025). Physicochemical and Microbiological Characteristics of Pork Meat Exposed to SoRegen® Technology. *Veterinary World*, 484–490. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2025.484-490>
- Quayson, E. T., Ayernor, G. S., Johnson, P.-N. T., & Ocloo, F. C. K. (2021). Effects of Two Pre-Treatments, Blanching and Soaking, as Processing Modulation on Non-Enzymatic Browning Developments in Three Yam Cultivars from Ghana. *Heliyon*, 7(6), e07224. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07224>
- Romero-López, M. R., Osorio-Díaz, P., Flores-Morales, A., Robledo, N., & Mora-Escobedo, R. (2015). Chemical Composition, Antioxidant Capacity and Prebiotic Effect of Aguamiel (Agave Atrovirens) during in Vitro Fermentation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(2), 281–292.
- Russell, C., Grimes, C., Baker, P., Sievert, K., & Lawrence, M. A. (2021). The Drivers, Trends and Dietary Impacts of Non-Nutritive Sweeteners in the Food Supply: A Narrative Review. *Nutrition Research Reviews*, 34(2), 185–208. <https://doi.org/10.1017/S0954422420000268>
- Saini, C. S., & Sharma, H. K. (2016). Effect of Pectin Coating on Colour and Quality of Dehydrated Pineapple during Storage. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 35(2). <https://doi.org/10.18805/ajdfr.v35i2.10721>
- Sánchez Jiménez, E. (2025). El Maguey Mexiquense: Patrimonio Biocultural y Sustentabilidad En El Aprovechamiento de Una Planta Ancestral y Bien Común. *Revista Veritas de Difusão Científica*, 5(3), 1982–2011. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v5i3.327>
- Santos-Zea, L., Rosas-Pérez, A. M., Leal-Díaz, A. M., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2016). Variability in Saponin Content, Cancer Antiproliferative Activity and Physicochemical Properties of Concentrated Agave Sap. *Journal of Food Science*, 81(8). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13376>
- Saraiva, A., Carrascosa, C., Ramos, F., Raheem, D., & Raposo, A. (2022). Agave Syrup: Chemical Analysis and Nutritional Profile, Applications in the Food Industry and Health Impacts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7022. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127022>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2016). *NOM-003-SAGARPA-2016, Relativa a Las Características de Sanidad, Calidad Agroalimentaria, Autenticidad, Etiquetado y Evaluación de La Conformidad Del Jarabe de Agave*. (Núm. 003).
- Secretaría de Economía. (2007). *ALIMENTOS MIEL – ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA. (CANCELA LA NMX- F-036-1997-NORMEX)*. (NMX-F-036-NORMEX-2006).
- Secretaría de Economía. (2008). *NMX-FF-110-SCFI-2008*.
- Seog, E. J., Kim, H. R., & Lee, J. H. (2008). Optimization of Onion Cookie Baking Process Using Response Surface Methodology. *Journal of Food Quality*, 31(3), 306–322. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2008.00202.x>
- Sexton, J., Everingham, Y., Donald, D., Staunton, S., & White, R. (2018). A Comparison of Non-Linear Regression Methods for Improved on-Line near Infrared Spectroscopic Analysis of a Sugarcane Quality Measure. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(5), 297–310. <https://doi.org/10.1177/0967033518802448>
- Shamsi, E., & Khalilabadi, F. (2022). *Inner Filter Effect Mediated Fluorescence Properties as a Tool to Monitor the Quantity of Grape-Must Caramel in Balsamic Vinegar*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1953256/v1>
- Shamsudin, R., Ariffin, S. H., Zainol Abdullah, W. N. Z., Azmi, N. S., & Abdul Halim, A. A. (2021). Modelling the Kinetics of Color and Texture Changes of Dabai (Canarium Odontophyllum Miq.) during Blanching. *Agronomy*, 11(11), 2185. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112185>
- Shapla, U. M., Solayman, Md., Alam, N., Khalil, Md. I., & Gan, S. H. (2018). 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) Levels in Honey and Other Food Products: Effects on Bees and Human Health. *Chemistry Central Journal*, 12(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s13065-018-0408-3>
- Shiri, A., Sadeghi, E., Abdolmaleki, K., Dabirian, F., Shirvani, H., & Soltani, M. (2025). Eco-Friendly and Smart Electrospun Food Packaging Films Based on Polyvinyl Alcohol and Sumac Extract: Physicochemical, Mechanical, Antibacterial, and Antioxidant Properties. *Food Science & Nutrition*, 13(4),

- e70190. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70190>
- Smith, T. J. S., Wolfson, J. A., Jiao, D., Crupain, M. J., Rangan, U., Sapkota, A., Bleich, S. N., & Nachman, K. E. (2015). Caramel Color in Soft Drinks and Exposure to 4-Methylimidazole: A Quantitative Risk Assessment. *PLOS ONE*, *10*(2), e0118138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118138>
- Spence, C., Wan, X., Woods, A., Velasco, C., Deng, J., Youssef, J., & Deroy, O. (2015). On Tasty Colours and Colourful Tastes? Assessing, Explaining, and Utilizing Crossmodal Correspondences between Colours and Basic Tastes. *Flavour*, *4*(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13411-015-0033-1>
- Suárez, A. U. N. (2023). El Agave Pulquero En La Región de La Altiplanicie Pulquera Del Estado de Hidalgo. En *Maguey Aguamiel/Pulque* (1o ed., Vol. 1, p. 69). El Colegio del Estado de Hidalgo.
- Sung, W.-C., Chi, M.-H., Chiou, T.-Y., Lin, S.-H., & Lee, W.-J. (2020). Influence of Caramel and Molasses Addition on Acrylamide and 5-HYDROXYLMETHYLFURFURAL Formation and Sensory Characteristics of NON-CENTRIFUGAL Cane Sugar during Manufacturing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *100*(12), 4512–4520. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10492>
- Tadini, C. C., & Gut, J. A. W. (2022). The Importance of Heating Unit Operations in the Food Industry to Obtain Safe and High-Quality Products. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 853638. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.853638>
- Toufeili, I., Itani, M., Zeidan, M., Al Yamani, O., & Kharroubi, S. (2022). Nutritional and Functional Potential of Carob Syrup Versus Date and Maple Syrups. *Food Technology and Biotechnology*, *60*(2), 266–278. <https://doi.org/10.17113/ftb.60.02.22.7419>
- Tounsi, L., & Kechaou, N. (2022). Comparative Study between Carob and Date Syrups. *JOURNAL OF OASIS AGRICULTURE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT*, *4*(3), 55–61. <https://doi.org/10.56027/JOASD.162022>
- Vicente-Magueyal, F. J., Bautista-Méndez, A., Villanueva-Tierrablanca, H. D., García-Ruiz, J. L., Jiménez-Islas, H., & Navarrete-Bolaños, J. L. (2020). Novel Process to Obtain Agave Sap (Aguamiel) by Directed Enzymatic Hydrolysis of Agave Juice Fructans. *LWT*, *127*, 109387. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109387>
- Xu, S., Liu, Y., Mu, X., Chen, H., Tao, G., Sun, Z., Yang, N., Ma, F., & Fisk, I. D. (2023). Impact of Charged Ionic Species (NaCl and KCl) on the Generation of Color and Volatile Aroma Compounds during Caramelization. *Food Science and Technology*, *43*, e97622. <https://doi.org/10.1590/fst.97622>
- Yanti, N. A., Ahmad, S. W., Ramadhan, L. O. A. N., Jamili, Muzuni, Walhidayah, T., & Mamangkey, J. (2021). Properties and Application of Edible Modified Bacterial Cellulose Film Based Sago Liquid Waste as Food Packaging. *Polymers*, *13*(20), 3570. <https://doi.org/10.3390/polym13203570>
- Yargatti, R., & Muley, A. (2022). Agave Syrup as a Replacement for Sucrose: An Exploratory Review. *Functional Foods in Health and Disease - Online ISSN: 2160-3855; Print ISSN: 2378-7007*, *12*(10), 590–600. <https://doi.org/10.31989/ffhd.v12i10.1003>
- Yu, A.-N., Li, Y., Yang, Y., & Yu, K. (2017). The Browning Kinetics of the Non-Enzymatic Browning Reaction in L-ascorbic Acid/Basic Amino Acid Systems. *Food Science and Technology*, *38*(3), 537–542. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.08717>
- Yu, A.-N., & Tang, L.-P. (2016). Kinetics of Non-Enzymatic Browning Reaction from the l-Ascorbic Acid/l-Cysteine Model System. *Czech Journal of Food Sciences*, *34*(6), 503–510. <https://doi.org/10.17221/86/2016-CJFS>
- Yu, P., Xu, X.-B., & Yu, S.-J. (2015). Comparative Study of the Effect of Glucosamine and Free Ammonium on 4-Methylimidazole Formation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *63*(36), 8031–8036. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02616>
- Yu, Q., Zhang, M., Wang, D., Law, C. L., & Liu, Y. (2025). Formulation and Process Optimization of Longjiang Brine: ANN-GA Optimization Based on the Color and Flavor of Brined Pork. *Journal of Food Science*, *90*(5), e70238. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70238>
- Zarei, M., Fazlara, A., & Tulabifard, N. (2019). Effect of Thermal Treatment on Physicochemical and Antioxidant Properties of Honey. *Heliyon*, *5*(6), e01894. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01894>
- Zareifard, M. R., Savard, T., Marcotte, M., Lecompte, J.-Y., & Grabowski, S. (2015). Combined Effects of Mild Acidification and Thermal Treatment on Color and Texture of Green Beans. *International Journal of Food Properties*, *18*(8), 1847–1862. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.941476>

-
- Zhang, J., Han, H., Xia, J., & Gao, M. (2016). Degradation Kinetics of Vitamin C in Orange and Orange Juice during Storage. *Advance Journal of Food Science and Technology*, *12*(10), 555–561. <https://doi.org/10.19026/ajfst.12.3303>
- Zidar, B. J., Knezovic, Z., Pribisalic, A., Luetic, S., Jurcic, K., Knezovic, N., & Sutlovic, D. (2025). Consumer Perceptions of Artificial Sweeteners in Food Products, Consumption Frequency, and Body Mass Index: A Multivariate Analysis. *Nutrients*, *17*(5), 814. <https://doi.org/10.3390/nu17050814>
- Zúñiga Escobar, M., & Niederle, P. A. (2017). Calidad de Los Alimentos, Estandarización y Ferias Del Agricultor En Costa Rica. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, *30*. <https://doi.org/10.15359/prn e.15-30.8>