



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA
EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE
CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE**

Valeria Inés Muñoz Zeceña

Asesorado por el Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco

Guatemala, octubre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA
EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE
CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

VALERIA INÉS MUÑOZ ZECEÑA

ASESORADO POR EL ING. RONAL ADOLFO HERRERA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADORA	Inga. Ana Gloria Montes Peña
EXAMINADORA	Inga. Ana Rufina Herrera Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 7 de julio de 2021.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Valeria Inés Muñoz Zeceña', with a large, stylized flourish at the end.

Valeria Inés Muñoz Zeceña

Guatemala 18 de abril de 2022

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez Mejía:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Valeria Inés Muñoz Zeceña, quien se identifica con el registro académico 2015-03679 y con el CUI 2961 21886 12 01.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Ronal Adolfo Herrera Orozco
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 781



Guatemala, 19 de julio de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.014.2022.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **018-2021**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Valeria Inés Muñoz Zeceña**.
Identificado con número de carné: **2961218861201**.
Identificado con registro académico: **201503679**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Ronal Adolfo Herrera Orozco, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



INGENIERO QUÍMICO
WILLIAM EDUARDO FAGIÁN CRUZ
COL. 1734

William Eduardo Fagián Cruz
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo



LNG.DIRECTOR.183.EIQ.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE**, presentado por: **Valeria Inés Muñoz Zeceña**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”



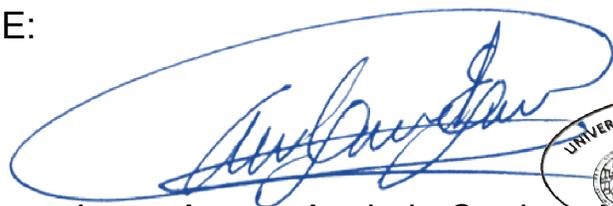
Ing. Williams G. Alvarez M.Sc., M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, septiembre de 2022.

LNG.DECANATO.OI.634.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DESARROLLO DE MODELOS CINÉTICOS DE LA EVAPORACIÓN DE AGUA, DE LA EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE UNA SALSA DE TOMATE**, presentado por: **Valeria Inés Muñoz Zeceña**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, octubre de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Agradezco por la vida que me dio, así como la oportunidad de haber estudiado en esta universidad, y por ser mi guía a largo de toda mi vida y siempre bendecirme.
- Mis padres** Arely Zeceña Hernández y Juan Carlos Muñoz Espinoza por su apoyo, paciencia y amor que me han dado a lo largo de toda mi vida. Por todo el esfuerzo que hicieron para darme la oportunidad de desarrollarme como profesional y como persona.
- Mi hermana** Eva Sofía Muñoz Zeceña por su apoyo, cariño y por todos los buenos momentos que compartimos juntas.
- Mi novio** Cristóbal José Raúl Ardón Traña por ser mi compañero de vida, y darme todo su apoyo y cariño.
- Mis tías** Doris y Yanira Zeceña por todo el apoyo y cariño que siempre me han dado.
- Mi familia** A mis abuelos, tíos, primos, Denisse Diéguez y Julieta Traña, por su cariño, apoyo y motivación.

Mis amigos

Ana Escobar, Sharon Santa Luz, Génesis Luttmann, Laura Herrera, Heidy Mayorga, Pablo Cardona, Sara Boche y Alejandra Cifuentes por darme su apoyo, amistad y motivarme a nunca rendirme.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y darme la oportunidad de formarme como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por formarme como profesional en la Ingeniería Química.
Olmeca	Por permitirme realizar mi trabajo de investigación en sus instalaciones.
Ronal Herrera	Por todo su apoyo y paciencia en la realización de mi trabajo de investigación.
Franklin Casco	Por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de investigación en Olmeca.
Mis amigos	Por siempre darme su apoyo.
Mis compañeros de la Universidad de San Carlos de Guatemala	Por todo el apoyo que me dieron a lo largo de la carrera.
Ing. William Fagiani	Por su apoyo durante la realización de mi trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Naturaleza de los fluidos	5
2.1.1. Fluidos con propiedades independientes del tiempo.....	6
2.1.2. Fluidos con propiedades dependientes del tiempo y viscoelásticos.....	7
2.2. Evaporación.....	7
2.2.1. Tipos de evaporadores	8
2.2.2. Métodos de operación de evaporadores	9
2.3. Proceso de elaboración de productos derivados del tomate ...	10
2.3.1. Pastas y puré de tomate.....	10
2.3.2. Salsas de tomate y ketchup.....	11
2.4. Parámetros de calidad para salsas de tomate.....	12
2.4.1. Color	13
2.4.2. Contenido de sólidos solubles y sólidos totales.....	13
2.4.3. pH y acidez.....	13

2.4.4.	Consistencia.....	14
2.4.5.	Concentración de carotenoides y licopeno.....	14
2.4.6.	Concentración de azúcares reductores.....	14
2.4.7.	Contenido de microorganismos.....	15
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
3.1.	Variables	17
3.2.	Delimitación de campo de estudio	18
3.2.1.	Localización.....	18
3.3.	Recursos humanos disponibles	18
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	18
3.4.1.	Reactivos.....	19
3.4.2.	Instrumentos de medición	19
3.4.3.	Equipo adicional	19
3.4.4.	Cristalería y materiales.....	20
3.4.5.	Equipo de protección personal.....	20
3.5.	Técnica cuantitativa.....	21
3.5.1.	Procedimiento para la determinación de la consistencia.....	22
3.5.2.	Procedimiento para determinación de la viscosidad.....	23
3.5.3.	Procedimiento determinación del contenido de sólidos solubles	24
3.5.4.	Procedimiento para determinación del porcentaje de acidez	25
3.5.5.	Procedimiento para determinación de pH	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	27
3.7.	Análisis estadístico.....	27
3.7.1.	Diseño de experimento	27

3.7.2.	Hipótesis estadística.....	30
3.7.3.	Análisis de varianza.....	35
3.7.4.	Prueba de Tukey	36
3.7.5.	Determinación de modelos cinéticos	37
3.7.5.1.	Tipos de reacciones.....	37
3.7.5.2.	Velocidad de reacción	37
3.7.5.3.	Leyes de velocidad	38
3.7.5.4.	Métodos para determinar la ley de velocidad	39
3.7.5.5.	Modelo de agua evaporada en función del tiempo y modelo de contenido de sólidos solubles en función del tiempo.....	42
3.7.6.	Criterios para la selección y ajuste de modelos.....	42
4.	RESULTADOS	49
4.1.	Propiedades de calidad promedio y agua evaporada promedio de salsa de tomate	49
4.2.	Modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo	61
4.3.	Modelos de agua evaporada en función del tiempo	63
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	69
5.1.	Propiedades de calidad de salsa de tomate en función del tiempo.....	69
5.2.	Modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo	72
5.3.	Modelos de evaporación de agua en función del tiempo.....	74

CONCLUSIONES..... 77
RECOMENDACIONES 79
REFERENCIAS 81
APÉNDICES..... 89
ANEXOS..... 107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fluidos newtonianos y no newtonianos.....	7
2.	Marmita abierta o artesa	9
3.	Proceso de elaboración de kétchup	12
4.	Procedimiento para determinar la consistencia.....	22
5.	Procedimiento para determinación de la viscosidad	23
6.	Procedimiento determinación del contenido de sólidos solubles	24
7.	Procedimiento para determinación del porcentaje de acidez	25
8.	Procedimiento para determinación de pH	26
9.	Consistencia promedio en función del tiempo.....	49
10.	Viscosidad promedio en función del tiempo	50
11.	pH promedio en función del tiempo.....	51
12.	Porcentaje de acidez promedio en función del tiempo	52
13.	Concentración de sólidos solubles promedio en función del tiempo	53
14.	Agua evaporada promedio en función del tiempo	54

TABLAS

I.	Variables proceso de cocción salsa de tomate	17
II.	Resumen diseño para la viscosidad.....	28
III.	Resumen diseño para consistencia.....	28
IV.	Resumen diseño para contenido de sólidos solubles	28
V.	Resumen diseño para pH.....	29
VI.	Resumen diseño para porcentaje de acidez	29

VII.	Resumen análisis de varianza	36
VIII.	Modelos cinéticos propuestos contenido de sólidos solubles	42
IX.	Resumen análisis de varianza para regresión	47
X.	Análisis de varianza experimental de consistencia en función del tiempo.....	55
XI.	Análisis de varianza experimental de viscosidad en función del tiempo.....	55
XII.	Análisis de varianza experimental del pH en función del tiempo	56
XIII.	Análisis de varianza experimental del porcentaje de acidez en función del tiempo.....	56
XIV.	Análisis de varianza experimental del contenido de sólidos solubles en función del tiempo.....	57
XV.	Prueba de Tukey para consistencia en función del tiempo.....	57
XVI.	Prueba de Tukey para viscosidad en función del tiempo.....	58
XVII.	Prueba de Tukey para pH en función del tiempo.....	58
XVIII.	Prueba de Tukey para porcentaje de acidez en función del tiempo.....	59
XIX.	Prueba de Tukey para el contenido de sólidos solubles en función del tiempo	60
XX.	Modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo.....	61
XXI.	Resumen análisis de regresión para modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo.....	62
XXII.	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo cinético de orden cero.....	62
XXIII.	Análisis de varianza para modelo cinético de orden cero	62
XXIV.	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo cinético de primer orden	63
XXV.	Análisis de varianza para modelo cinético de primer orden.....	63
XXVI.	Modelos agua evaporada en función del tiempo.....	64

XXVII.	Prueba de correlación lineal.....	64
XXVIII.	Resumen análisis de regresión para modelos de la cantidad de agua evaporada en función del tiempo	65
XXIX.	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo lineal de cantidad de agua evaporada en función del tiempo.....	65
XXX.	Análisis de varianza para modelo lineal de cantidad de agua evaporada en función del tiempo	66
XXXI.	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo polinomial grado dos de cantidad de agua evaporada en función del tiempo..	66
XXXII.	Análisis de varianza para modelo polinomial grado dos de cantidad de agua evaporada en función del tiempo	67
XXXIII.	Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo polinomial grado tres de cantidad de agua evaporada en función del tiempo.....	67
XXXIV.	Análisis de varianza para modelo polinomial grado de cantidad de agua evaporada en función del tiempo	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetros
cP	Centipoise
%Brix	Contenido de sólidos solubles expresado en porcentaje
°C	Grados Celsius
g	Gramos
Kg	Kilogramo
psi	Libras por pulgada cuadrada
psia	Libras por pulgada cuadrada absoluta
ml	Mililitros
min	Minutos
Pa	Pascal
%	Porcentaje
% Acidez	Porcentaje de acidez titulable como ácido acético
pH	Potencial de hidrogeno
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
t	Tiempo en minutos

GLOSARIO

α	Nivel de significancia.
AIC	Criterio Akaike.
B	Contenido de sólidos solubles expresado en porcentaje de Brix.
β_i	Estimadores de mínimos cuadrados.
BIC	Criterio Bayesiano.
Calor	Forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro debido a una diferencia de temperatura.
<i>Cold Break</i>	Tratamiento térmico que se realiza a temperaturas menores que el tratamiento <i>Hot Break</i> . Se recomienda para salsas de baja viscosidad.
Conducción	Transferencia de energía de las partículas con más energía de una sustancia hacia las menos energéticas debido a la interacción entre partículas.
Convección	Transferencia de calor debido a los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos.

Esfuerzo cortante	Es la componente tangencial de una fuerza que se produce sobre una superficie y que se requiere para que una unidad de área de una sustancia se deslice sobre otra.
ECMP	Error cuadrático medio de predicción.
Evaporación	Operación unitaria en la cual, utilizando el mecanismo de transferencia de calor mediante ebullición o vaporización, se separan los sólidos de un líquido.
F	F de Fisher.
Fluido	Sustancia que sufre deformación debido al esfuerzo cortante.
Fluido newtoniano	Fluido que obedece la ley de Newton de una relación lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad cortante. Poseen viscosidad constante cuando la temperatura y presión estática son fijas.
Fluido no newtoniano	Fluidos que poseen una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte por lo que su viscosidad aparente es función de la velocidad aplicada.
<i>Hot break</i>	Tratamiento térmico que permite obtener un producto con mejor contenido de pectina. Se recomienda para salsas, ketchup, pures entre otros.

IC	Intervalos de confianza.
Lc	Salsa concentrada expresada en kilogramos.
Material termosensible	Material sensible a degradación a temperaturas elevadas.
Pectina	Polisacárido de origen vegetal presente en las paredes celulares. Contribuyen la textura de las frutas, los vegetales y los productos procesados.
Propiedades térmicas	Propiedades que determinan el comportamiento que posee un material frente al calor.
<i>r</i>	Coeficiente de correlación de Pearson.
R^2	Coeficiente de determinación.
R^2_{aj}	Coeficiente de determinación ajustado.
Radiación	Tipo de transferencia de calor en donde la energía se emite por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones debido a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.
Reología	Estudia la forma en que la materia fluye cuando es sometida a deformación. En la industria alimenticia se utiliza para control de calidad, caracterización del

producto, desarrollo de formulaciones adecuadas y para el diseño de plantas industriales.

tc T de Student crítico.

tr T de Student calculado.

Transferencia de calor Ciencia que busca determinar las razones por las que se da la transferencia de calor de un sistema a otro.

Vida de anaquel Es el tiempo en que un producto alimenticio conserva sus propiedades.

Velocidad de cizallamiento La velocidad de cizallamiento también conocida como gradiente de velocidad, es una medida del cambio de velocidad.

Viscosidad Resistencia que un fluido ejerce al esfuerzo cortante.

ws Agua evaporada expresado en kilogramo.

wf Alimentación expresada en kilogramo.

xc Concentración de salsa final expresado en porcentaje.

xf Concentración de salsa inicial expresado en porcentaje.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado con el objetivo de estudiar el comportamiento de la cantidad de agua evaporada y de los sólidos solubles en función del tiempo durante el proceso de cocción de una salsa de tomate, mediante la construcción de modelos cinéticos. Así mismo, se evaluó el efecto del tiempo de cocción sobre los parámetros de calidad: viscosidad, consistencia, contenido de sólidos solubles en Brix, pH y porcentaje de acidez de la salsa de tomate.

Para obtener estos modelos y observar el efecto del proceso sobre estos parámetros, se tomaron muestras durante diferentes intervalos de tiempo en el proceso. El contenido de sólidos solubles se midió por reflectometría, la viscosidad con un viscosímetro rotacional Brookfield, la consistencia mediante el uso de un consistómetro de Bostwick, el pH utilizando un potenciómetro y el porcentaje de acidez por volumetría.

Se sospecha que las propiedades de calidad evaluadas presentan cierta variación durante el proceso de cocción. Sin embargo, la consistencia, la viscosidad, así como el contenido de sólidos solubles son las propiedades de calidad que presenta una variación significativa con el tiempo de cocción, a diferencia del pH y el porcentaje de acidez.

Fueron construidos dos modelos cinéticos, de orden cero y primer orden para el cambio del contenido de sólidos solubles respecto al tiempo, así como tres modelos uno lineal y dos modelos polinomiales de grado dos y tres para la

cantidad de agua evaporada respecto al tiempo durante el proceso de cocción de la salsa de tomate.

Se determinó que los modelos cinéticos propuestos se ajustan al comportamiento de las variables de contenido de sólidos solubles y tiempo, pero el modelo que describe mejor la relación entre ambas variables es el modelo cinético de primer orden. Así mismo que el modelo que presenta un mayor ajuste de acuerdo con el análisis estadístico realizado es el modelo polinomial de grado dos para la cantidad de agua evaporada en respecto al tiempo.

OBJETIVOS

General

Obtener modelos cinéticos que describan la evaporación de agua, la evolución del cambio del contenido sólidos solubles y describir el comportamiento de los parámetros de calidad en función del tiempo de una salsa de tomate para facilitar el control de las condiciones del proceso de concentración.

Específicos

1. Describir el comportamiento de la viscosidad, consistencia, concentración de sólidos solubles, pH y acidez de la salsa de tomate en función del tiempo de concentración mediante diagramas de dispersión, análisis de varianza y prueba de Tukey, para facilitar el control de los parámetros de calidad durante la concentración de salsa de tomate.
2. Obtener un modelo cinético que relacione la cantidad de agua evaporada en función del tiempo de procesamiento por medio de un diagrama de dispersión, análisis de regresión y análisis de correlación para facilitar el control de mermas del proceso de concentración de salsa de tomate.
3. Determinar un modelo cinético que describa la evolución del cambio del contenido de sólidos solubles mediante un diagrama de dispersión y un análisis de regresión para poder controlar el proceso de concentración de la salsa de tomate.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el tomate es un producto líder entre los vegetales procesados. El tomate se procesa por medio de diferentes métodos permitiendo obtener una variedad de productos como concentrados, pastas, puré, salsa kétchup y salsa de tomate. Durante la producción de salsa de tomate una de las etapas más importantes es la concentración por evaporación debido a que determina la calidad del producto final. (Dhumal et al., 2015)

Debido a que durante el proceso de la transformación de frutas y vegetales es importante el control y conocimiento de las condiciones de proceso, se han realizado diferentes trabajos donde Zhang y colaboradores (2014) investigaron el efecto de las condiciones de procesamiento en pastas de tomate y también sobre el estudio y comportamiento de las propiedades fisicoquímicas. (Hassen et al., 2019; Ordóñez-Santos et al., 2008; Xu et al., 2018)

De igual manera se han realizado trabajos de investigación sobre la obtención de modelos matemáticos de evaporación de agua y modelos cinéticos que describan el comportamiento del contenido de sólidos solubles de salsa de tomate y otros concentrados de frutas. (Alizadeh et al., 2020; Ha & Thuy, 2020)

Aun cuando se ha estudiado el efecto de las condiciones de operación, el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y la descripción matemática mediante cinética del contenido de sólidos solubles y la evaporación de agua en la obtención de diferentes tipos de concentrados de frutas y vegetales, los estudios sobre la cinética de la concentración de la salsa de tomate son limitados. (Ha & Thuy, 2020)

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo matemático de evaporación de agua, un modelo cinético del comportamiento del contenido sólidos solubles en Brix y evaluar el comportamiento de la viscosidad, consistencia, contenido de sólidos solubles, acidez y pH de una salsa de tomate en función del tiempo de procesamiento.

Para obtener estos modelos y observar la influencia del proceso sobre estos parámetros, se tomaron muestras durante diferentes intervalos de tiempo durante el proceso. El contenido de sólidos solubles se determinó de acuerdo con el procedimiento descrito en la Norma AOAC 970.59., la viscosidad de acuerdo con lo que indica la Norma D2196, la consistencia de acuerdo con el procedimiento indicado en la Norma ASTM F1080-93., el pH de acuerdo con el método descrito en la Norma AOAC 981.12. y la acidez titulable mediante la Norma AOAC 942.15.

Con los valores obtenidos se determinó un modelo cinético que describe el comportamiento de la concentración de la salsa por medio de la evaluación de los modelos de orden cero y primer orden, a través de diferentes criterios estadísticos mediante un análisis regresión. (Alizadeh et al., 2020)

También se realizaron balances de masa para determinar la cantidad de agua evaporada en función del tiempo de cocción y con ello obtener un modelo de evaporación de agua.

La obtención de dicho modelo se realizó por medio la evaluación de diferentes modelos por de prueba de correlación y mediante diferentes criterios de estadísticos a través de un análisis de regresión. (Ha & Thuy, 2020)

Los resultados de viscosidad, consistencia, contenido de sólidos solubles en Brix, pH, y porcentaje acidez se representaron de forma gráfica mediante

diagramas de dispersión para observar su comportamiento y los valores obtenidos se evaluaron mediante un ANOVA y mediante la prueba de Tukey. Las pruebas de hipótesis fueron evaluadas con un nivel de confiabilidad del 95 %.

1. ANTECEDENTES

En el mundo se procesan aproximadamente 35 millones de toneladas de tomate anualmente, para obtener concentrados, jugos, conservas, salsa kétchup y salsa de tomate. (WTPC,2021)

La salsa de tomate se obtiene mediante una serie de procesos industriales en donde una de las etapas más importantes para su elaboración es la concentración por evaporación. (Valenzuela, 2018) La concentración por evaporación es una de las principales operaciones unitarias en la industria de la transformación de la fruta y tiene una gran importancia ya que determina la calidad del producto final. (Dhumal et al., 2015)

Debido a la importancia que tiene el control de las condiciones de procesamiento y la preservación de la calidad en la transformación de frutas y vegetales, se han realizado diversos trabajos de investigación sobre el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas durante la concentración por evaporación y sobre la obtención de modelos matemáticos.

Ha y Thuy (2020) realizaron un estudio cinético del cambio del contenido de agua y sólidos solubles totales de salsa de tomate *Black Cherry* por evaporación rotativa al vacío mediante el cual evaluaron el efecto de la aplicación de diferentes condiciones de vacío en la temperatura de ebullición durante el proceso. En esta investigación se demostró que el comportamiento del cambio de sólidos solubles totales se describió mediante un modelo exponencial de tres parámetros y que hubo una relación lineal entre la eliminación de agua y el tiempo durante la concentración de la salsa de tomate.

Se han realizado otras investigaciones sobre la obtención de diferentes tipos de concentrados de frutas por diferentes métodos de evaporación. Alizadeh y colaboradores (2020) utilizaron la cinética de evaporación del agua para describir el comportamiento del contenido de sólidos solubles totales del zumo de agracejo. Este estudio determinó que el contenido de sólidos solubles totales estaba relacionado a ecuaciones de primer orden y orden cero.

Igualmente, se realizó un estudio donde se observó el efecto que provocan en las propiedades fisicoquímicas del zumo de granada, diferentes métodos de evaporación. Mediante esta investigación se determinó que los métodos convencionales de evaporación como la evaporación a presión atmosférica provocan la degradación del color y la pérdida de compuestos volátiles si no se controlan de forma adecuada, por lo que es importante conocer que efecto tiene el proceso de evaporación sobre el color, pruebas sensoriales, pruebas microbiológicas, así como en las propiedades fisicoquímicas. (Dhumal et al., 2015)

De forma similar, otros autores han realizado investigaciones donde se evaluó la calidad de las pastas de tomate (Zhang et al., 2014) y los efectos de las condiciones de operación en las propiedades microbiológicas y fisicoquímicas en la calidad de este producto. (Hassen et al., 2019)

También, se realizó un estudio donde se determinó qué variables fisicoquímicas producen una mayor variabilidad en productos comerciales de tomate. Se determinó que las variables que producen una mayor variabilidad en estos productos comerciales son: la concentración, consistencia y las variables de color independientes de la concentración. (Ordóñez-Santos et al., 2008)

Además, se realizó una investigación para desarrollar una nueva tecnología de procesamiento continuo de doble tornillo, inyección directa de vapor y vapor en camisa, para la obtención de pasta de tomate. Se realizó una comparación de esta nueva tecnología con los métodos de procesamiento en caliente, procesamiento de batidora Waring y concentración por medio de una marmita enchaquetada. Al mismo tiempo, se observó el comportamiento que presentan las propiedades de calidad de viscosidad y consistencia, en función del contenido de sólidos solubles totales durante el proceso de concentración. Se determinó mediante este trabajo que, durante el proceso de concentración, la consistencia aumento para los cuatro métodos empleados de procesamiento y que la pérdida de consistencia se puede evitar calentando la pasta a 90 °C o más durante el procesamiento. (Xu et al., 2018)

Como resultado de estas investigaciones realizadas se evidencia la importancia de conocer las condiciones óptimas necesarias para la obtención de productos de tomate, al igual que identificar y observar cómo varían las propiedades fisicoquímicas más importantes a considerar durante el proceso de concentración.

Por lo tanto, los trabajos realizados sobre el proceso de concentración por evaporación (Alizadeh et al., 2020; Dhumal et al., 2015; Ha & Thuy, 2020), y sobre el estudio de las propiedades de calidad de los productos comerciales de tomate (Hassen et al., 2019; Ordóñez-Santos et al., 2008; Xu et al., 2018; Zhang et al., 2014) proporcionan una base para esta investigación en la obtención de modelos descriptivos sobre la evaporación de agua, comportamiento del contenido de sólidos solubles totales, así como de la influencia de las condiciones de procesamiento sobre las propiedades de calidad de viscosidad, consistencia, contenido de sólidos solubles totales, acidez y pH salsas de tomate.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Naturaleza de los fluidos

Un fluido se puede definir como una sustancia que sufre una deformación debido al esfuerzo cortante. (Streeter et al., 2000) La resistencia que un fluido ejerce al movimiento se conoce como viscosidad. (Cengel & Cimbala, 2006) Los líquidos y gases simples poseen viscosidad constante cuando la temperatura y presión son fijas. A los fluidos que presentan este comportamiento se les conoce como newtonianos y algunos ejemplos son agua, soluciones diluidas, aceite, leche, jugos clarificados y suero de jugo. (Perry, 1984)

Estos fluidos poseen una relación lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. (Mott, 2006) La viscosidad de los gases de este tipo de fluidos aumenta con la temperatura y es aproximadamente independiente de la presión. Sin embargo, a presiones más elevadas, su viscosidad aumenta con el incremento de la presión. (McCabe et al., 1991) En los líquidos, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura y debido a que son incompresibles, la presión no afecta su viscosidad. (Geankoplis, 1998)

Los líquidos no newtonianos son los que poseen una relación no lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Este tipo de fluidos se dividen en tres clases: fluidos independientes del tiempo, fluidos dependientes del tiempo y fluidos viscoelásticos. (Mott, 2006)

2.1.1. Fluidos con propiedades independientes del tiempo

En los fluidos independientemente del tiempo la viscosidad no varía con el tiempo. Estos pueden ser: fluidos plásticos de Bingham, materiales pseudoplásticos y materiales dilatantes. (Mott, 2006)

Los fluidos plásticos de Bingham son los fluidos no newtonianos más simples, difieren de los newtonianos en que su relación lineal entre el esfuerzo cortante y a la razón de corte no inician en el origen. (da Silva Rosa & de Moraes Júnior, 2019)

En la clasificación de materiales pseudoplásticos se encuentran la mayoría de los fluidos no newtonianos como soluciones poliméricas y suspensiones de pulpa de papel o pigmentos. (Perry, 1984) Por lo general, los productos a base de tomate se caracterizan como fluidos pseudoplásticos. Sin embargo, las magnitudes de las propiedades de flujo y la clasificación reológica pueden variar dependiendo del tipo de producto, contenido de sólidos, tamaño de partícula, presencia de aditivos, y las condiciones de procesamiento. (Kubo et al., 2019)

Los materiales dilatantes poseen un comportamiento reológico contrario a los materiales pseudoplásticos. En estos la viscosidad se incrementa al aumentar la razón de corte. Algunos ejemplos de este tipo son las arenas movedizas y suspensiones de almidón. (Perry, 1984)

Figura 1. **Fluidos newtonianos y no newtonianos independientes del tiempo**

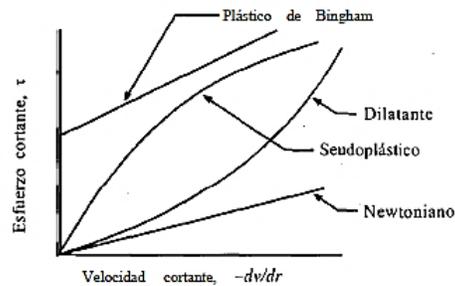


FIGURA 3.5-1 Diagrama de esfuerzo cortante para fluidos newtonianos y no newtonianos independientes del tiempo.

Fuente: Geankoplis (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*.

2.1.2. Fluidos con propiedades dependientes del tiempo y viscoelásticos

En los fluidos dependientes del tiempo el esfuerzo cortante cambia con la duración del corte. Los Fluidos tixotrópicos poseen una estructura que puede sufrir cambios en función del tiempo bajo corte. Los materiales reopécticos incrementan su viscosidad aparente con más rapidez mediante la agitación. (da Silva Rosa & de Moraes Júnior, 2019) Los fluidos viscoelásticos poseen recuperación elástica de la deformación que sufren en el flujo, es decir poseen propiedades elásticas y viscosas. (Geankoplis, 1998)

2.2. Evaporación

La evaporación es una operación unitaria en la cual, utilizando el mecanismo de transferencia de calor mediante ebullición o vaporización, se separan los sólidos de un líquido.

El objetivo de la evaporación es concentrar una solución de un soluto no volátil sólido y un solvente líquido, el cual normalmente es agua. (Hackett, 2018)

La evaporación es utilizada para la producción de concentrados líquidos en diferentes tipos de industrias, principalmente en las de procesamiento de alimentos, química, farmacéutica y de papel. (Hackett, 2018)

Esta se realiza mediante evaporadores. La selección del tipo de evaporador depende de los medios utilizados para la agitación, circulación del líquido, configuración para la transferencia de calor, propiedades físicas y químicas de la solución que se está concentrando y del vapor, así como de la presión y temperatura del proceso. (Geankoplis 1998)

Algunas de las propiedades que afectan los métodos de procesamiento son: concentración, solubilidad, formación de espumas, presión y temperatura, sensibilidad térmica de los materiales, formación de incrustaciones y materiales de construcción. (McCabe et al., 1991)

Durante la operación de los evaporadores es importante considerar la presión, temperatura de alimentación, el efecto de la carga del líquido y de la fricción sobre la caída de temperatura y el efecto de la elevación del punto de ebullición de las disoluciones. (Geankoplis, 1998)

2.2.1. Tipos de evaporadores

Existen diferentes tipos de evaporadores los cuales se utilizan de acuerdo con el tipo de producto. Estos son: evaporador de película agitada, de caída de película, marmita abierta o artesa, evaporador vertical con circulación natural o de tubos cortos, evaporador de tubos horizontales con circulación natural,

evaporador vertical de tubos largos, y evaporador de circulación forzada. (Kern,1999)

El evaporador de marmita artesa es el más simple. En estos equipos se hierve el líquido. Son equipos económicos y fáciles de operar en los cuales el suministro de calor proviene de la condensación de vapor en chaquetas o serpentines. Algunos de estos equipos poseen paletas para la agitación del líquido. (Geankoplis, 1998)

Figura 2. **Marmita abierta o artesa**



Fuente: Chávez (2015). *Tipos y equipos de evaporadores*.

Consultado el 7 de octubre de 2020. Recuperado de <https://es.slideshare.net/krinashavz/tipos-y-equipos-de-evaporadores>.

2.2.2. Métodos de operación de evaporadores

Los métodos de operación de los evaporadores pueden ser de simple efecto o de efecto múltiple. (Foust et al., 2006) La evaporación de simple efecto es un método sencillo en donde se utiliza un evaporador y en el cual, el vapor que procede del líquido se condensa y se desecha, por lo que desperdicia energía. (Kern, 1999)

En el método de evaporación de múltiple efecto, el vapor generado en el primero de los evaporadores se utiliza como fluido de calentamiento del segundo evaporador y así sucesivamente. (Foust et al., 2006) Este método aumenta la evaporación por kilogramo de vapor de agua empleado debido a que el vapor es reutilizado. (Cengel & Ghajar, 2011) Los sistemas múltiple efecto dependiendo del tipo de alimentación pueden ser: hacia adelante, en retroceso o contracorriente, paralelo o mixto. (Kern, 1999)

2.3. Proceso de elaboración de productos derivados del tomate

El tomate es un alimento muy importante que se utiliza para la elaboración de diferentes platos y recetas a nivel mundial. Por ello la industria procesadora del tomate se ha convertido en una de las industrias más importantes dentro del sector de la alimentación. (MachinePoint, s.f.) Los productos que se obtienen del procesamiento del tomate son: tomates en conserva enteros, jugos de tomate, pastas y pure de tomate, salsas de tomate, salsa ketchup y tomates congelados. (FAO,2009)

2.3.1. Pastas y puré de tomate

La obtención de concentrados de tomate se utiliza para la elaboración de salsas o puré. La pasta de tomate es una pasta espesa que puede utilizarse para la elaboración de ketchup o jugo de tomate. La pasta de tomate es un puré concentrado. El puré posee un contenido de sólidos solubles de entre 7 % y 24 %, y la pasta de tomate mayor o igual a 24 %. (CODEX ALIMENTARIUS, 2013)

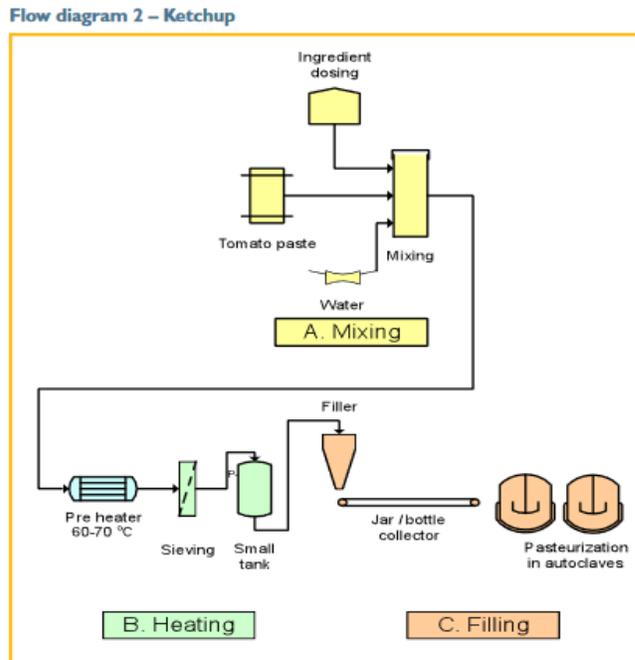
2.3.2. Salsas de tomate y ketchup

El ketchup es una salsa elaborada mediante concentrados de tomate que debe tener un valor mínimo de 26 % de sólidos solubles naturales. El producto se considera salsa de tomate cuando contiene entre 18 % y 25 % del total de sólidos solubles naturales. (DRAFT MALAWI STANDARD, 2018)

Para obtener salsa de tomate, el proceso inicia con la recepción e inspección de materia prima. Después, la materia prima pasa por un proceso de lavado y selección del tomate. Una vez seleccionados los tomates estos se someten a un proceso de triturado y escaldado. (López et al., 1985)

El proceso de escaldado es un tratamiento térmico que se utiliza para inactivar las pectinas presentes en el tomate debido a que estas pueden afectar la consistencia. Posteriormente, el producto pasa por un proceso de despulpado para eliminar la cáscara y semillas presentes. (López et al., 1985) Seguidamente, pasa al proceso de concentración el cuál se realiza por medio de evaporadores. Para obtener la salsa, el concentrado se mezcla por lotes o en un sistema continuo con agua, especias, y en algunos casos verduras. A continuación, la salsa pasa por un proceso de pasteurización. Finalmente, la salsa se envasa de forma aséptica. (MachinePoint, s.f.)

Figura 3. **Proceso de elaboración de ketchup**



Fuente: The Food and Agriculture Organization (2009). *Agribusiness handbook Fruit and Vegetables Processing*. Consultado el 6 de octubre de 2020. Recuperado de <http://www.fao.org/3/al177e/al177e.pdf> .

2.4. **Parámetros de calidad para salsas de tomate**

Existen diferentes tipos de pruebas de control de calidad para garantizar la obtención de un producto que cumpla con los estándares requeridos, sin embargo, los principales controles son: color, contenido de sólidos solubles y sólidos totales, pH, consistencia, contenido de carotenoides y licopeno, acidez total, azúcares reductores y pruebas microbiológicas. (Ciruelos et al., 2008)

2.4.1. Color

Es una característica importante de la calidad de los alimentos debido a que determina la elección del consumidor. La determinación colorimétrica se realiza por medio de una comparación con escalas de color Munsell. (Ramírez-Rosas et al., 2019)

2.4.2. Contenido de sólidos solubles y sólidos totales

Indican sobre la cantidad de sólidos presentes. De forma práctica se utiliza el contenido en sólidos solubles conocido como ° Brix, debido a la facilidad para determinarse analíticamente por medio de un refractómetro. La cantidad de sólidos proporciona información sobre la cantidad de concentrado de tomate utilizado durante la preparación, lo cual es importante para cumplir con las especificaciones de cada producto. (Velásquez, 2020)

Los sólidos del tomate son un factor importante ya que influyen en el rendimiento final, la consistencia y la calidad general del producto acabado. El incremento de los sólidos solubles aumenta la consistencia, proporciona un mayor rendimiento del producto y reduce los costos de elaboración. (Thakur et al., 1996)

2.4.3. pH y acidez

El pH es la medida de acidez o alcalinidad de un alimento y es un factor determinante para controlar el crecimiento bacteriano. El valor del pH establece la temperatura de esterilización. (Noale,2015) Las condiciones de procesado influyen sobre este parámetro, así como en la acidez de los productos de tomate procesados.

En los alimentos, el grado de acidez indica el contenido en ácidos libres. (Ramírez-Rosas et al., 2019) Algunos de los ácidos presentes en el tomate son el ácido acético, ácido cítrico, ácido glutámico, entre otros; sin embargo, el mayoritario es el ácido cítrico. Para la determinación de la acidez se realiza una valoración ácido-base, expresando el resultado como porcentaje de ácido. (Ciruelos et al., 2008)

2.4.4. Consistencia

Este parámetro es importante en la posterior elaboración de algunos productos que requieren de un alto espesor, como en el ketchup. La consistencia es una característica que depende de la variedad del tomate, de la temperatura de rotura y puede modificarse mediante la inactivación enzimática mediante los procesos de *Hot Break* o *Cold Break*. Esta se determina utilizando un consistómetro de Bostwick. (Anthon et al., 2008)

2.4.5. Concentración de carotenoides y licopeno

Los carotenoides son un grupo de pigmentos liposolubles responsables de los colores naturales amarillos, naranjas y rojos de las frutas y vegetales. El contenido de licopeno varía según la variedad, condiciones de cultivo y condiciones de almacenamiento. (Noale,2015)

2.4.6. Concentración de azúcares reductores

Este parámetro tiene una gran influencia sobre el sabor. El contenido de azúcares se puede determinar mediante diversos métodos de oxidación - reducción como mediante el método de Fehling, o por medio de una cromatografía líquida de alta resolución. (Ciruelos et al., 2008)

2.4.7. Contenido de microorganismos

Debido a que los tomates pueden presentar contaminación física, química y microbiológica, en las diferentes etapas del proceso de producción las pruebas microbiológicas son esenciales durante todo el proceso para garantizar la inocuidad de los productos. (Anversa et al., 2020) Estos métodos de control de microorganismos dependen de la sensibilidad que estos tengan y el tipo de producto. Algunos aspectos que resaltan son la sensibilidad al calor o frío de los microorganismos, necesidad de agua y oxígeno, sensibilidad a álcalis, radiación y productos químicos. (Ciruelos et al., 2008)

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables involucradas en el proceso de cocción se presentan en la siguiente tabla:

Tabla I. **Variables proceso de cocción salsa de tomate**

Variable	Unidad	Tipo de variable	Escala	Dependiente	Independiente	Constante
Peso de salsa	Kg	Continua	De razón	X		
Sólidos solubles	% Brix	Continua	De razón	X		
Viscosidad	Pa*s	Continua	De razón	X		
Consistencia	cm	Continua	De razón	X		
pH	N/A	Continua	De razón	X		
Acidez titulable como ácido acético	% Acidez	Continua	De razón	X		
Tiempo de cocción	min	Factor	De razón		X	
Presión de vapor	psi	Continua	De razón			X
Presión de trabajo	psia	Continua	De razón			X
Revoluciones por minuto	rpm	Continua	De razón			X

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

3.2. Delimitación de campo de estudio

La obtención de datos experimentales se realizó en las siguientes áreas de la empresa procesadora de alimentos.

3.2.1. Localización

- Área de cocción de salsas de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala.
- Laboratorio de Fisicoquímica, de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

Los recursos humanos disponibles para este trabajo fueron:

- Investigador: Valeria Inés Muñoz Zeceña
- Asesor: Ronal Adolfo Herrera Orozco
- Encargado del área de cocción de salsas
- Asistente del área de aseguramiento de calidad de análisis fisicoquímicos

3.4. Recursos materiales disponibles

En esta sección se presentan los reactivos, cristalería, instrumentos de medición, equipos y materiales utilizados.

3.4.1. Reactivos

- Hidróxido de sodio Merck $\geq 97\%$
- Fenolftaleína Merck
- Alcohol etílico desnaturalizado al 95 %
- Agua desmineralizada para uso industrial Salvavidas

3.4.2. Instrumentos de medición

- Consistómetro de Bostwick marca CSC SCIENTIFIC, modelo SCS, rango de medición de hasta 23 cm.
- Viscosímetro rotacional marca BROOKFIELD, modelo RVDVE, rango de medición de 0- 13.33e06 cP.
- Potenciómetro marca THERMO SCIENTIFIC, modelo ORION STAR A211, rango de medición de 0-14 pH.
- Balanza analítica marca OHAUS, modelo E12140, peso máximo 210 g.
- Termómetro marca VWR, modelo 61220-416, temperatura máxima de 100 °C.
- Refractómetro digital marca ATAGO, modelo POCKET PAL a-, rango de medición 0-85 % Brix.
- Bureta digital marca Brand, modelo TITRETTE, rango de medición de 0-50 ml.

3.4.3. Equipo adicional

- Marmita artesana
- Manómetros
- Termocuplas
- Toma muestras

- Cronómetro
- Agitador magnético
- Plancha de agitación marca Barnstead Thermolyne, rango máximo de temperatura 540 °C

3.4.4. Cristalería y materiales

- Espátula
- Beacker de 250 ml
- Beacker de 100 ml
- Probeta de 100 ml
- Beackers de 100 ml y 250 ml
- Varilla de agitación
- Beacker de 100 ml

3.4.5. Equipo de protección personal

- Bata de laboratorio
- Mascarilla
- Guantes de látex
- Botas industriales
- Lentes protectores
- Tapones de oído
- Cofia

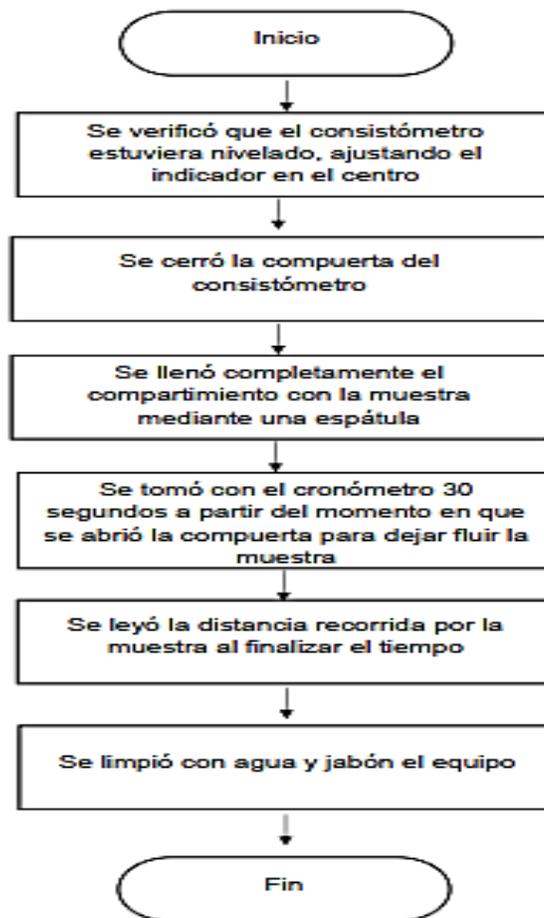
3.5. Técnica cuantitativa

Las técnicas que se utilizaron para este trabajo de investigación fueron de tipo cuantitativo. El contenido de sólidos solubles se determinó por reflectometría, a través de un refractómetro, mediante la metodología fundamentada en la Norma AOAC 970.59. La viscosidad se obtuvo mediante viscosimetría por medio un viscosímetro rotacional de agujas Brookfield de acuerdo con la Norma D2196. La consistencia se determinó mediante el uso de un consistómetro de Bostwick, de acuerdo con la Norma ASTM F1080-93. El pH se obtuvo por potenciometría de acuerdo con el método descrito en la Norma AOAC 981.12. La acidez titulable se determinó por medio de una titulación mediante la metodología fundamentada en la Norma AOAC 942.15.

3.5.1. Procedimiento para la determinación de la consistencia

El procedimiento utilizado para determinar la consistencia se presenta en la siguiente figura:

Figura 4. Procedimiento para determinar la consistencia

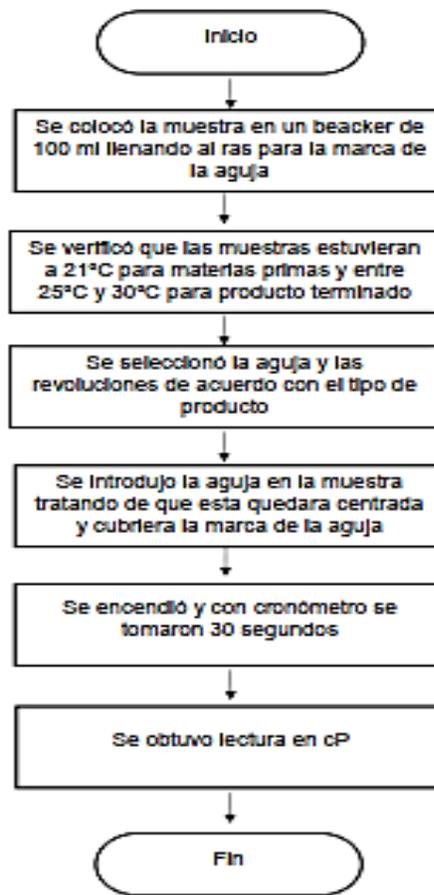


Fuente: elaboración propia, con método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la ASTM. (2019). *ASTM F1080-93 Standard Test Method for Determining the Consistency of Viscous Liquids Using a Consistometer.*

3.5.2. Procedimiento para determinación de la viscosidad

El procedimiento utilizado para determinar la viscosidad se presenta en la siguiente figura:

Figura 5. Procedimiento para determinación de la viscosidad

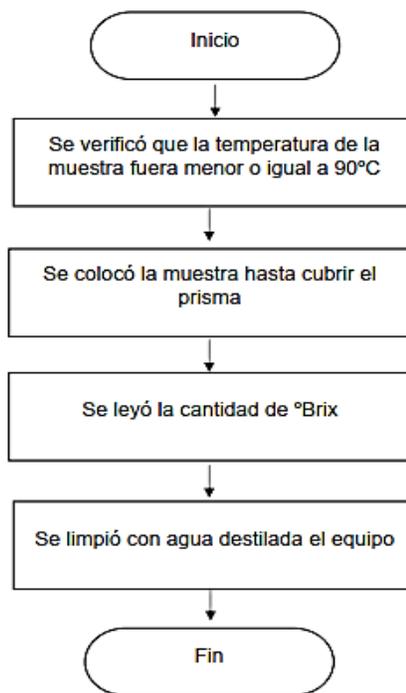


Fuente: elaboración propia, con método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la ASTM. (2020). *ASTM D2196 Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer*.

3.5.3. Procedimiento determinación del contenido de sólidos solubles

El procedimiento utilizado para determinar el contenido de sólidos solubles se presenta en la siguiente figura:

Figura 6. **Procedimiento determinación del contenido de sólidos solubles**

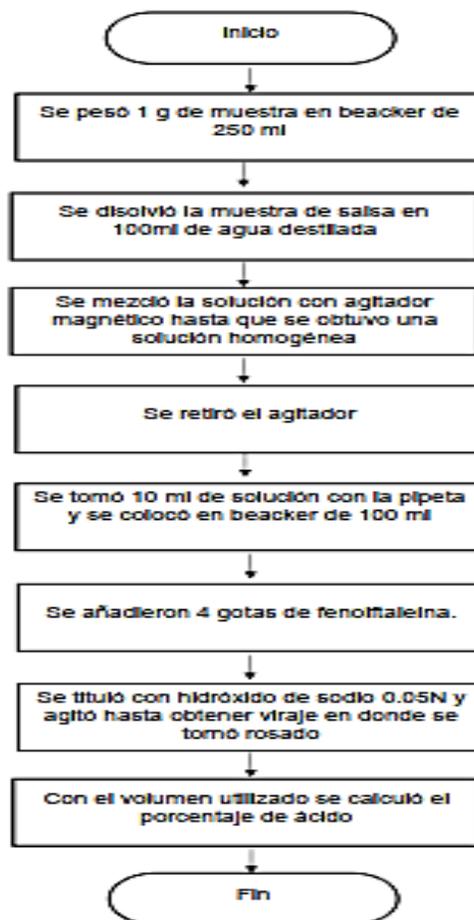


Fuente: elaboración propia, con método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la AOAC (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL, AOAC 970.59.*

3.5.4. Procedimiento para determinación del porcentaje de acidez

El procedimiento utilizado para determinar el porcentaje de acidez se presenta en la siguiente figura:

Figura 7. Procedimiento para determinación del porcentaje de acidez

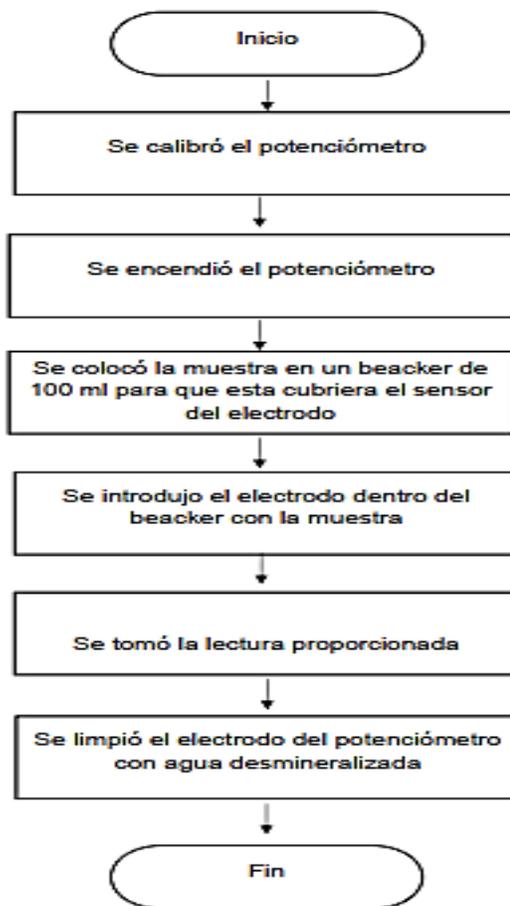


Fuente: elaboración propia, con método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la AOAC (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL, AOAC 942.15.*

3.5.5. Procedimiento para determinación de pH

El procedimiento utilizado para determinar el pH se presenta en la figura siguiente:

Figura 8. Procedimiento para determinación de pH



Fuente: elaboración propia, con método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la AOAC (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL, AOAC 981.12.*

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La toma de muestras y recolección de datos de salsa de tomate se realizó en el área de cocción de salsas. Los análisis de viscosidad, contenido de sólidos solubles en Brix, pH, porcentaje de acidez titulable como ácido acético y prueba de consistencia o de Bostwick se realizaron en el laboratorio de fisicoquímica de la empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala.

3.7. Análisis estadístico

En esta sección se presenta el diseño experimental, pruebas de hipótesis, métodos utilizados para la determinación de modelos cinéticos, así como los criterios de selección y ajuste de modelos utilizados.

3.7.1. Diseño de experimento

En el diseño experimental se clasificó por su papel para el análisis al tiempo como variable explicativa de tipo factor y la viscosidad, consistencia, contenido de sólidos solubles en Brix, pH y porcentaje acidez como variable respuesta.

- Viscosidad
 - Factor: tiempo en minutos
 - Variable respuesta: viscosidad

Tabla II. Resumen diseño para la viscosidad

Factor	tiempo	Réplicas	5
Corridas base	6	Corridas totales	30

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- Consistencia
 - Factor: tiempo en minutos
 - Variable respuesta: consistencia

Tabla III. Resumen diseño para consistencia

Factor	tiempo	Réplicas	5
Corridas base	6	Corridas totales	30

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- Contenido de sólidos solubles en Brix
 - Factor: tiempo en minutos
 - Variables respuesta: contenido de sólidos solubles en Brix

Tabla IV. Resumen diseño para contenido de sólidos solubles

Factor	tiempo	Réplicas	5
Corridas base	41	Corridas totales	205

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- pH
 - Factor: tiempo en minutos
 - Variable respuesta: pH

Tabla V. **Resumen diseño para pH**

Factor	tiempo	Réplicas	5
Corridas base	6	Corridas totales	30

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

- Porcentaje de acidez como ácido acético
 - Factor: tiempo en minutos
 - Variables respuesta: porcentaje de acidez como ácido acético

Tabla VI. **Resumen diseño para porcentaje de acidez**

Factor	tiempo	Réplicas	5
Corridas base	6	Corridas totales	30

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

3.7.2. Hipótesis estadística

Para el análisis estadístico se realizó la comprobación de las siguientes hipótesis:

- Objetivo específico No. 1
 - Hipótesis de análisis de varianza

- Hipótesis nula H_{01} :

La viscosidad de la salsa de tomate no varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

- Hipótesis alternativa H_{i1} :

La viscosidad de la salsa de tomate varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

- Hipótesis nula H_{02} :

La consistencia de la salsa de tomate no varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

- Hipótesis alternativa H_{i2} :

La consistencia de la salsa de tomate varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

- Hipótesis nula H_{03} :

El contenido de sólidos solubles de la salsa de tomate no varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

- Hipótesis alternativa H_{i3} :

El contenido de sólidos solubles de la salsa de tomate varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

- Hipótesis nula H_{04} :

El pH de la salsa de tomate no varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

- Hipótesis alternativa H_{i4} :

El pH de la salsa de tomate varía significativamente con el tiempo

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

- Hipótesis nula H_{05} :

El porcentaje de acidez de la salsa de tomate no varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

- Hipótesis alternativa H_{i5} :

El porcentaje de acidez de la salsa de tomate varía significativamente con el tiempo.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

- Objetivo específico No. 2

- Prueba de correlación

- Hipótesis nula H_{06} :

- La correlación que describe la relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo no se relaciona linealmente

- $$\rho = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i6} :

- La correlación que describe la relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo se relaciona linealmente ($|r_t| > t_{n-2;1-\alpha/2}$).

- $$\rho \neq 0$$

- Hipótesis sobre los estimadores de mínimos cuadrados

- Hipótesis nula H_{07} :

- La relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo no se puede describir mediante el modelo de la recta ajustada.

- $$\beta_i = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i7} :

- La relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo se puede describir mediante el modelo de la recta ajustada.

- $$\beta_i \neq 0 \quad i = 0,1$$

- Análisis de varianza de regresión

- Hipótesis nula H_{08} :

El modelo obtenido no es útil para predecir la relación entre el agua evaporada y el tiempo para la salsa de tomate.

$$\beta_1 = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i8} :

El modelo obtenido es útil para predecir la relación entre el agua evaporada y el tiempo para la salsa de tomate.

$$\beta_1 \neq 0$$

- Objetivo específico No 3

- Hipótesis sobre los estimadores de mínimos cuadrados

- Hipótesis nula H_{09} :

La relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo no se puede describir mediante el modelo de la recta ajustada del modelo cinético de orden cero.

$$\beta_i = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i9} :

La relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo se puede describir mediante el modelo de la recta ajustada del modelo cinético de orden cero.

$$\beta_i \neq 0 \quad i = 0,1$$

- Hipótesis nula H_{010} :

La relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo no se puede describir mediante el modelo de la recta ajustada del modelo cinético de primer orden.

$$\beta_i = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i10} :

La relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo se puede describir mediante el modelo de la recta ajustada del modelo cinético de primer orden.

$$\beta_i \neq 0 \quad i = 0,1$$

- Análisis de varianza ANOVA de regresión

- Hipótesis nula H_{011} :

El modelo de orden cero no es útil para predecir la relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo para la salsa de tomate.

$$\beta_1 = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i11} :

El modelo de orden cero es útil para predecir la relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo para la salsa de tomate.

$$\beta_1 \neq 0$$

- Hipótesis nula H_{012} :

El modelo de primer orden no es útil para predecir la relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo para la salsa de tomate.

$$\beta_1 = 0$$

- Hipótesis alternativa H_{i12} :

El modelo de primer orden es útil para predecir la relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo para la salsa de tomate.

$$\beta_1 \neq 0$$

3.7.3. Análisis de varianza

Se realizó un análisis de varianza de un factor para el objetivo 1 con 5 repeticiones y un nivel de significancia del 95 %. La prueba ANOVA se basa en una comparación de dos estimados independientes de la varianza poblacional σ^2 .

Las hipótesis para esta prueba son:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1: \text{Al menos dos de las medias no son iguales } \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$$

Para esta prueba se utilizó el estadístico de prueba F . La razón F es una relación entre la media cuadrática de tratamiento y el cuadrado medio del error y se define mediante la siguiente relación:

$$F = \frac{s_1^2}{s^2}$$

Esta razón se emplea para probar la igualdad de medias es un valor que tiene la distribución F con $n(k - 1)$ grados de libertad. Para un nivel de significancia de α se rechaza la hipótesis nula $F > F_\alpha$. Los cálculos para el análisis ANOVA se resumen en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Resumen análisis de varianza**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F calculada
Tratamientos	SCT	$k - 1$	$s_1^2 = \frac{SCT}{k - 1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Error	SCE	$k(n - 1)$	$s^2 = \frac{SCE}{n(k - 1)}$	
Total	STC	$nk - 1$		

Fuente: Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.

3.7.4. Prueba de Tukey

Se realizó la prueba de Tukey para el objetivo 1 con un nivel de significancia del 95 % y 5 repeticiones. Cuando se rechaza la hipótesis nula en un análisis de varianza, es necesario identificar cuales tratamientos son diferentes y provocan esta diferencia. (Gutiérrez & de la Vara, 2008) La prueba de Tukey es un método que permite comparar pares de medias de tratamientos mediante el valor crítico dado por la siguiente expresión:

$$T_\alpha = q_\alpha(k, N - k) \sqrt{s^2/n}$$

donde s^2 es el cuadrado medio del error, n es el número de observaciones por tratamiento, k es el número de tratamientos, $N - k$ son los grados de libertad para el error, α es el nivel de significancia y $q_\alpha(k, N - k)$ son puntos porcentuales de la distribución del rango estudentizado. De acuerdo con el criterio de esta prueba, son significativamente diferentes los pares de medias cuya diferencia muestral en valor absoluto sea mayor que T_α . (Gutiérrez & de la Vara, 2008)

3.7.5. Determinación de modelos cinéticos

La cinética química estudia la velocidad y mecanismo de una reacción, así como los factores de los cuales dependen las velocidades. La cinética tiene un amplio campo de aplicaciones en la industria de síntesis de productos, refinación de petróleo, petroquímica, síntesis de productos farmacéuticos, así como en la industria alimenticia. (Levine, 2014)

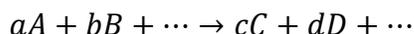
Para comprender como se obtiene un modelo cinético es necesario definir algunos términos importantes.

3.7.5.1. Tipos de reacciones

Las reacciones pueden ser homogéneas o heterogéneas. Una reacción se considera homogénea si ocurre por completo en una fase y se considera heterogénea si implica especies presentes en dos o más fases. (Levine. 2014)

3.7.5.2. Velocidad de reacción

Si se considera la siguiente reacción homogénea



Donde a, b, c, d son los coeficientes estequiométricos en la ecuación química balanceada y A, B, C, D son las especies químicas. (Levine, 2014) La velocidad a la que se consume cualquier reactivo es proporcional a su coeficiente estequiométrico por ello:

$$\frac{dnA/dt}{dnB/dt} = \frac{a}{b} \qquad \frac{1}{a} \frac{dnA}{dt} = \frac{1}{b} \frac{dnB}{dt}$$

Donde t es el tiempo y n_A es el número de moles de A. Por ello se puede definir la velocidad de conversión J como:

$$J \equiv -\frac{1}{a} \frac{dn_A}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{dn_B}{dt} = \dots = \frac{1}{c} \frac{dn_C}{dt} = \frac{1}{d} \frac{dn_D}{dt} = \dots$$

La velocidad de conversión J es una cantidad extensiva. (Levine, 2014) Por ello a la velocidad de conversión por volumen unitario se le conoce como velocidad de reacción \dot{r} .

$$\dot{r} \equiv \frac{J}{V} = \frac{1}{V} \left(-\frac{1}{a} \frac{dn_A}{dt} \right)$$

Donde la velocidad de reacción \dot{r} es una cantidad intensiva y depende de la temperatura, presión y concentraciones en un sistema homogéneo. (Levine, 2014) En la mayoría de los sistemas de estudio el volumen es constante por lo que se tiene que la ley de velocidad.

$$\dot{r} = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \dots = \frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d} \frac{d[D]}{dt} = \dots$$

3.7.5.3. Leyes de velocidad

Para la mayoría de las reacciones se encuentra de forma experimental que la velocidad \dot{r} con respecto al tiempo t se relaciona con las concentraciones de las especies mediante una expresión de la forma.

$$\dot{r} = k[A]^\alpha [B]^\beta \dots [L]^\gamma$$

Donde α, β, γ suelen ser números enteros o medios. La constante de proporcionalidad k se conoce como constante de velocidad o coeficiente de

velocidad y es función de la temperatura y presión. Se indica que la reacción tiene orden α con respecto de A, orden β respecto de B y así sucesivamente.

Los exponentes α, β, γ se conocen como ordenes parciales y la suma $\alpha + \beta + \dots + \gamma = n$ se conoce como orden global de reacción. (Levine, 2014)

3.7.5.4. Métodos para determinar la ley de velocidad

Cuando ya se han obtenido los datos de una reacción mediante el método adecuado, el modelo cinético o ley de velocidad se puede obtener mediante un tratamiento de datos. (Brizuela & Romano, s.f.) La ley de velocidad se puede determinar por los siguientes métodos: método de integración y método diferencial.

- Método integral

Se parte de una ecuación cinética que se supone representara el proceso. Este método implica un procedimiento de ensayo y error para determinar el orden de reacción. (Brizuela & Romano, s.f.) Para su aplicación se debe suponer el orden de reacción e integrar la ecuación. Después, se debe calcular la función de concentración resultante para los datos. Si la función se ajusta al comportamiento de los datos es probable que el orden supuesto sea correcto sino se debe de emplear otro orden de reacción y repetir el procedimiento. (UNEFM, s.f.)

Por ejemplo, si se tiene la reacción $B \rightarrow \text{Productos}$ y se parte de la siguiente expresión:

$$-\frac{d[B]}{dt} = \dot{r}B$$

Combinando el balance de moles con la ley de velocidad de acuerdo con el orden correcto se obtendrá una ecuación lineal.

Para una reacción de orden cero se tiene que la ley de velocidad es

$$\dot{r}_B = -k$$

Combinando el balance de moles se obtiene

$$\frac{d[B]}{dt} = -k$$

Integrando la expresión se obtiene que

$$\int_{[B_0]}^{[B]} d[B] = \int_0^t -k dt$$
$$[B] - [B_0] = -k(t - 0)$$
$$[B] = [B_0] - kt$$

Para una reacción de primer orden se tiene que $-\dot{r}_B = k[B]$. Combinando e integrando se obtiene:

$$-\frac{d[B]}{dt} = k[B]$$
$$\int_{[B_0]}^{[B]} -\frac{d[B]}{dt} = \int_0^t k dt$$
$$\ln [B] - \ln [B_0] = -k(t - 0)$$
$$\ln [B] = \ln [B_0] - kt$$
$$[B] = [B_0]e^{-kt}$$

El método integral es uno de los más utilizados para la interpretación de datos cinéticos sin embargo presenta la desventaja de que es un procedimiento de ensayo y error al suponer cuál puede ser el orden y luego comprobarlo con los resultados experimentales. (Brizuela & Romano, s.f.)

- Método diferencial

Se basa en las velocidades de las reacciones midiendo las pendientes en la curvas concentración-tiempo. Puede usarse siempre que sea posible medir con la velocidad de reacción instantánea. (UAM, 2011) Se busca relacionar la velocidad con la concentración de un reactivo mediante la siguiente expresión:

$$\dot{r}B = k[B]^n$$

Al aplicar logaritmo se obtiene

$$\log \dot{r}B = \log k + n \log [B]$$

Midiendo la velocidad de reacción para distintas composiciones de partida, el problema se transforma en un ajuste lineal multivariado. El resultado del ajuste permite determinar tanto la constante de velocidad como los órdenes parciales de reacción. El método diferencial presenta el inconveniente de que no siempre se pueden determinar las pendientes con facilidad. (Brizuela & Romano, s.f.)

3.7.5.5. Modelo de agua evaporada en función del tiempo y modelo de contenido de sólidos solubles en función del tiempo

Para obtener el modelo de agua evaporada se realizó un ajuste mediante un modelo de regresión lineal simple, así como la evaluación de modelos polinomiales de acuerdo con el ajuste que presentan los datos. (Ha & Thuy, 2020) Para obtener el modelo del contenido de sólidos solubles en función del tiempo se realizó la comparación de dos modelos cinéticos de orden cero y primer orden. Estos modelos fueron propuestos por Alizadeh y colaboradores (2020). El método cinético utilizado para la obtención de los modelos fue el método integral.

Tabla VIII. Modelos cinéticos propuestos contenido de sólidos solubles

Modelos cinéticos propuestos	
Modelo orden cero	$B = B_0 + k_c t$
Modelo de primer orden	$B = B_0 e^{k_c t}$

Fuente: Alizadeh, H. R., Morteza pour, H., Akhavan, H. R., & Balvardi, M. *Physicochemical changes of barberry juice concentrated by liquid desiccant-assisted solar system and conventional methods during the evaporation process*. Consultado el 20 de abril de 2021.

Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04919-z>.

3.7.6. Criterios para la selección y ajuste de modelos

Para el objetivo 2 se realizó un análisis de correlación por medio del coeficiente de correlación de Pearson. Asimismo, para el objetivo 2 y 3 se realizó un análisis de regresión por medio de: ANOVA de regresión, criterios de información, error cuadrático medio de predicción, coeficiente de determinación, coeficiente de determinación ajustado y mediante intervalos de confianza.

- Prueba de correlación

Se realizó una prueba de hipótesis de correlación lineal para el objetivo 2 con un nivel de significancia del 95 %. El coeficiente de correlación lineal r mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados x y y en una muestra. (Walpole et al.,2012)

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

Para contrastar que dos variables x e y se relacionan linealmente, se puede realizar una prueba de hipótesis:

Hipótesis Nula (H_0): $\rho = 0$

Hipótesis Alternativa (H_1): $\rho \neq 0$

La constante ρ se denomina coeficiente de correlación de la población. Esta prueba de hipótesis se puede realizar mediante la prueba t de correlación de Pearson. (Aparicio et al., s.f.)

$$r_t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

Para un nivel de significancia de α se rechaza la hipótesis nula cuando $|r_t| > t_{n-2;1-\alpha/2}$.

- Criterios de información

Estos pueden ser utilizados para identificación y diagnóstico. Se utilizó el criterio de Akaike y el criterio bayesiano.

- Criterio Akaike

El AIC es un método que permite seleccionar el modelo más adecuado para caracterizar los datos experimentales. Se define como:

$$AIC = -2 \log(Lik) + 2K$$

Donde $\log(Lik)$ es el logaritmo de la máxima verosimilitud, que permite determinar los valores de los parámetros libres de un modelo estadístico y K es el número de parámetros libres del modelo. Considera los cambios en la bondad de ajuste y las diferencias en el número de parámetros entre dos modelos. Los modelos que presentan el menor valor de AIC, se consideran como los mejores. (Sandra & Noguera, 2007)

- Criterio bayesiano

Se calcula como una función de la bondad de ajuste del $\log Lik$, el número de parámetros ajustados K y el número total de datos N . El modelo con el más bajo valor de BIC se considera el que mejor explica los datos con el mínimo número de parámetros. (Sandra & Noguera, 2007) Se define por la ecuación:

$$BIC = -2 \log Lik + \log(N) * K$$

- Error cuadrático medio de predicción

El ECMP se define mediante la siguiente expresión:

$$ECMP = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\widehat{y}_{p,j} - m_{p,j})^2$$

Donde $\widehat{y}_{p,j}$ es el valor ajustado cuando se utiliza el modelo con p parámetros y $m_{p,j} = E[y|X = x_{p,i}]$. Mediante este criterio se elige el modelo que tenga el valor mínimo de *ECMP*. (Macías & Pincay, 2012)

- Intervalos de confianza

Para los coeficientes de regresión, los intervalos de confianza se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$IC(\beta_0; 1-\alpha) = \widehat{\beta}_0 \pm t_{(n-2, 1-\alpha/2)} \sqrt{\sum_{t=1}^n x_1^2 S^2}$$

$$IC(\beta_1; 1-\alpha) = \widehat{\beta}_1 \pm t_{(n-2, 1-\alpha/2)} \sqrt{\frac{S^2}{S_{xx}}}$$

Donde $t_{(n-2, 1-\alpha/2)}$ es el cuantil correspondiente en una distribución t de Student con $n - 2$ grados de libertad. (Aparicio et al., s.f.)

- Contraste de hipótesis sobre los estimadores de mínimos cuadrados

Para un contraste de hipótesis sobre los coeficientes de regresión:

Hipótesis Nula (H_0): $\beta_i = 0$

Hipótesis alternativa (H_1): $\beta_i \neq 0 \quad i = 0, 1$

Se deben considerar los estadísticos descritos por las siguientes expresiones:

$$t_0 = \frac{\widehat{\beta}_0 - \beta_0}{s\sqrt{\sum_t x_1^2/nS_{xx}}}$$

$$t_1 = \frac{\widehat{\beta}_1 - \beta_1}{s/\sqrt{S_{xx}}}$$

Ambos estadísticos se distribuyen según una distribución t con $n - 2$ grados de libertad. La prueba consiste en obtener el $p - valor$ asociado al valor absoluto de estimación. Se rechaza la hipótesis nula cuando $p - valor \leq \alpha$. (Aparicio et al., s.f.)

$$p - valor = Pr|t_{n-2}|t_1|$$

$$p - valor = Pr|t_{n-2}|t_0|$$

Cuando $\beta_0 = 0$ lo que se está contrastando es si la recta tiene intercepción o pendiente nula. Si $\beta_1 = 0$ indica que existe correlación nula entre las variables y por ello ausencia de relación lineal. (Aparicio et al., s.f.)

- ANOVA para análisis de regresión

Se realizó un ANOVA de regresión para el objetivo 2 y 3 con un nivel de significancia del 95 %, para los modelos cinéticos de orden cero y primer orden, así como para obtener el modelo de evaporación de agua.

Por medio del método del análisis de varianza se puede analizar la calidad de la recta de regresión estimada. (Walpole et al.,2012) Para la prueba de hipótesis:

Hipótesis Nula (Ho): $\beta_1 = 0$

Hipótesis alternativa (H1): $\beta_1 \neq 0$

La hipótesis nula indica que la variación de los resultados y debida a las fluctuaciones de probabilidad o aleatorias son independientes de los valores de x . Para realizar esta prueba de hipótesis, para $n - 2$ grados de libertad se debe realizar el siguiente calculo:

$$F = \frac{SCR/1}{SCE/(n - 2)} = \frac{SCR}{s^2}$$

Donde para un nivel de significancia de α se rechaza la hipótesis nula cuando $F > F_{\alpha}$. Los cálculos para el ANOVA de regresión se resumen en la siguiente tabla:

Tabla IX. **Resumen análisis de varianza para regresión**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F calculada
Regresión	SCT	1	SCR	$\frac{SCR}{s^2}$
Error	SCE	$n - 2$	$s^2 = \frac{SCE}{n - 2}$	
Total	$STCC$	$n - 1$		

Fuente: Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.

- **Coeficiente de determinación**

El coeficiente de determinación se utiliza para evaluar la calidad del ajuste del modelo. Mide la proporción de la variabilidad de los datos Y que se explica mediante el modelo de regresión. (Gutiérrez & de la Vara, 2008) Este tiene valores entre $0 \leq R^2 \leq 1$ donde un valor cercano a 1, entre 0.6 y 1, implica que

buena parte de la varianza es explicada por la recta de regresión y cercano a 0 implica que la variabilidad de los datos queda sin explicar por la recta. (Aparicio et al., s.f.)

$$R^2 = \frac{SCT}{STCC}$$

- Coeficiente de determinación ajustado

Es un criterio para la selección de modelos. (Aparicio et al., s.f.) Para un modelo con p coeficientes esta dado por la siguiente expresión:

$$R^2_{aju(p)} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \left[1 - \left(1 - \frac{SSE(p)}{S_{yy}} \right) \right] \right)$$

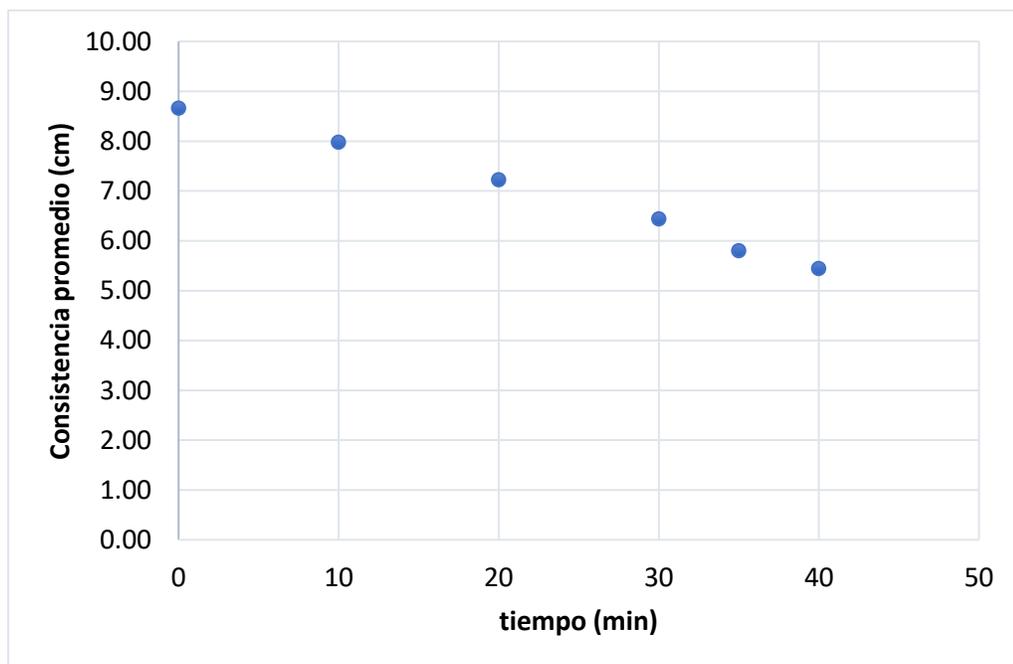
4. RESULTADOS

En esta sección se presenta una serie de gráficas, tablas y modelos que fueron obtenidos mediante el procedimiento descrito anteriormente.

4.1. Propiedades de calidad promedio y agua evaporada promedio de salsa de tomate

En esta sección, se presenta de forma gráfica el comportamiento las propiedades de calidad y agua evaporada promedio de la salsa de tomate.

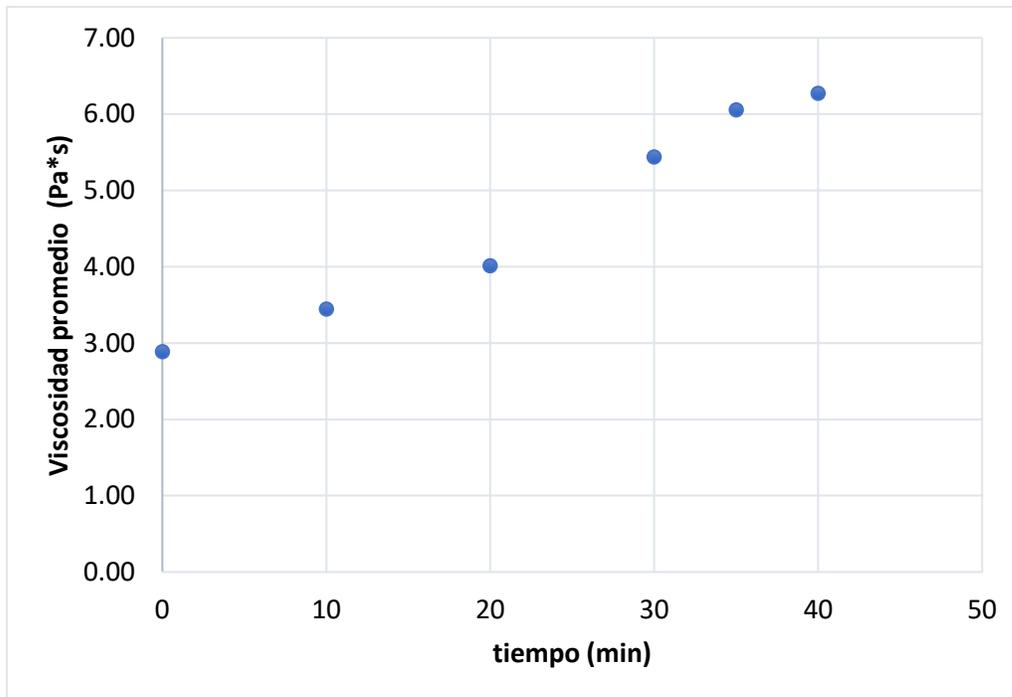
Figura 9. **Consistencia promedio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos apéndice 10.

En la figura 9, se observa gráficamente el comportamiento de la consistencia de la salsa de tomate en función del tiempo de cocción.

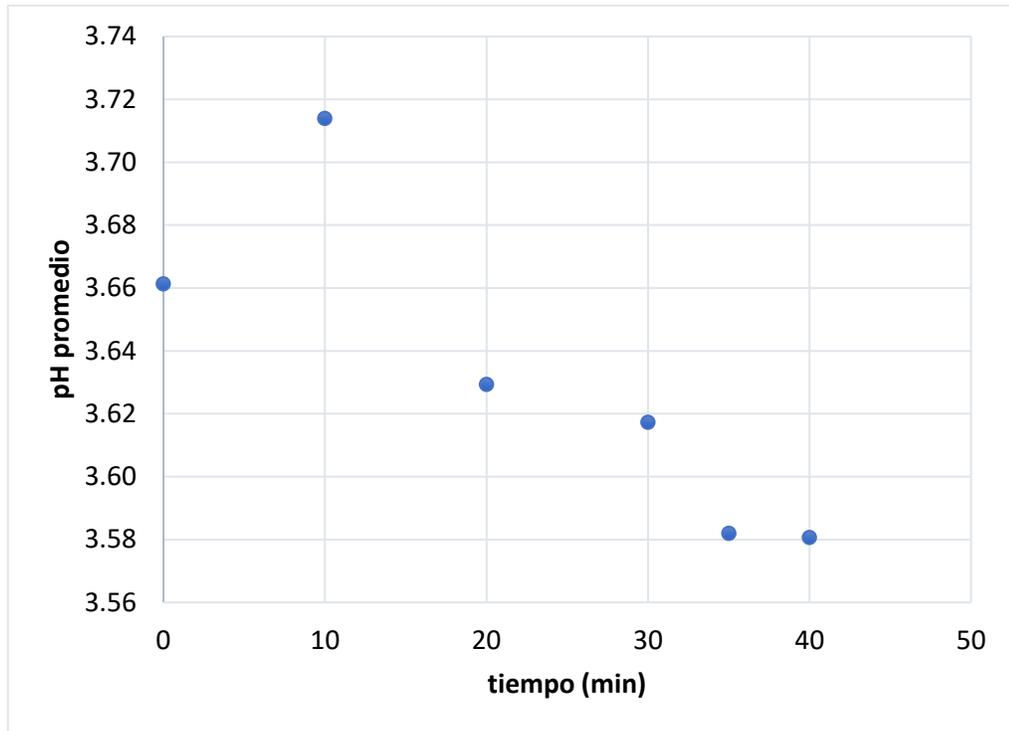
Figura 10. **Viscosidad promedio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos apéndice 11.

La figura 10, representa gráficamente la variación de la viscosidad de la salsa de tomate con el tiempo de cocción.

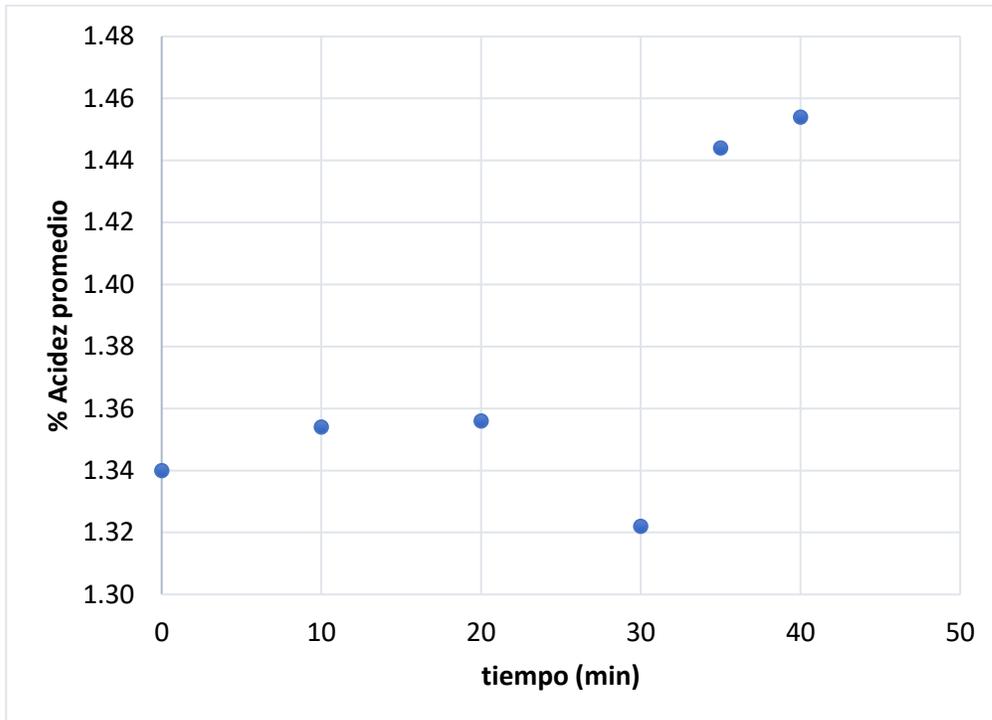
Figura 11. **pH promedio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos apéndice 12.

La figura 11 representa gráficamente el comportamiento del pH en función del tiempo.

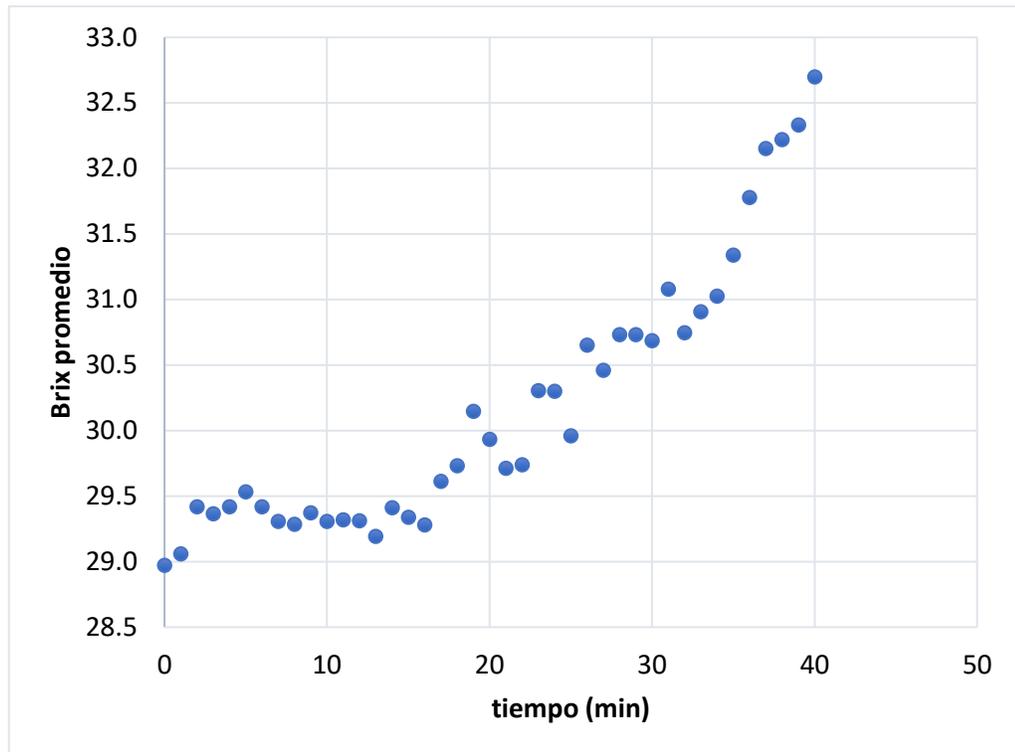
Figura 12. **Porcentaje de acidez promedio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos apéndice 13.

En la figura 12 se presenta de forma gráfica el comportamiento del porcentaje de acidez en función del tiempo durante el proceso de cocción de la salsa de tomate.

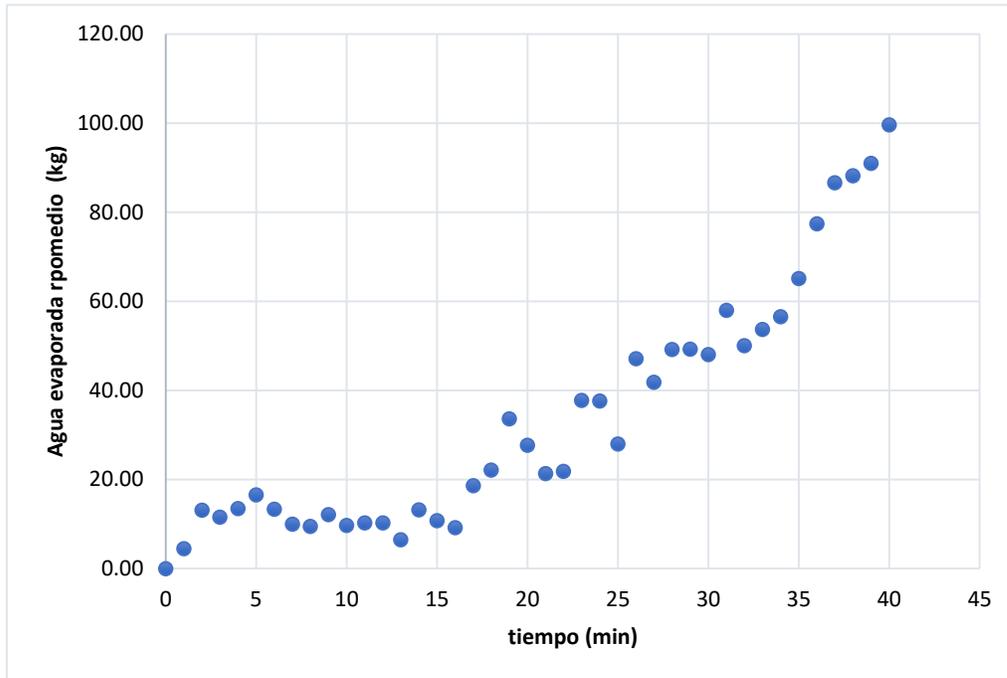
Figura 13. **Concentración de sólidos solubles promedio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos apéndice 14.

La figura 13 representa el comportamiento del contenido de sólidos solubles en función del tiempo durante el proceso de cocción de la salsa de tomate.

Figura 14. **Agua evaporada promedio en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia, con datos apéndice 15.

La figura 14 representa de forma gráfica la cantidad de agua que se evapora en función del tiempo durante el proceso de cocción de la salsa de tomate.

A continuación, se presenta un resumen de las pruebas de ANOVA experimental, contraste de hipótesis, así como las pruebas de Tukey realizadas para cada propiedad de calidad de la salsa de tomate.

Tabla X. **Análisis de varianza experimental de consistencia en función del tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	39.50	5	7.90	9.91	2.62	Rechazada
Tiempo (min)	39.50	5	7.90	9.91		
Error	19.14	24	0.80			
Total	58.64	29				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XI. **Análisis de varianza experimental de viscosidad en función del tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	50.91	5	10.18	3.29	2.62	Rechazada
Tiempo (min)	50.91	5	10.18	3.29		
Error	74.33	24	3.10			
Total	125.2	29				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XII. Análisis de varianza experimental del pH en función del tiempo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	0.07	5	0.01	1.11	2.62	Aceptada
Tiempo (min)	0.07	5	0.01	1.11		
Error	0.28	24	0.01			
Total	0.34	29				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XIII. Análisis de varianza experimental del porcentaje de acidez en función del tiempo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	0.08	5	0.02	1.37	2.62	Aceptada
Tiempo (min)	0.08	5	0.02	1.37		
Error	0.28	24	0.01			
Total	0.35	29				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XIV. **Análisis de varianza experimental del contenido de sólidos solubles en función del tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	203.17	40	5.08	1.54	1.47	Rechazada
Tiempo (min)	203.17	40	5.08	1.54		
Error	542.04	164	3.30			
Total	745.21	204				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XV. **Prueba de Tukey para consistencia en función del tiempo**

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	Agrupación
40	5.45	5	0.40	A
35	5.80	5	0.40	A B
30	6.44	5	0.40	A B C
20	7.23	5	0.40	B C D
10	7.98	5	0.40	C D
0	8.66	5	0.40	D

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XVI. **Prueba de Tukey para viscosidad en función del tiempo**

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	Agrupación
0	2.89	5	0.79	A
10	3.44	5	0.79	A
20	4.01	5	0.79	A
30	5.44	5	0.79	A
35	6.06	5	0.79	A
40	6.27	5	0.79	A

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XVII. **Prueba de Tukey para pH en función del tiempo**

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	Agrupación
40	3.58	5	0.05	A
35	3.58	5	0.05	A
30	3.62	5	0.05	A
20	3.63	5	0.05	A
0	3.66	5	0.05	A
10	3.71	5	0.05	A

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XVIII. **Prueba de Tukey para porcentaje de acidez en función del tiempo**

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	Agrupación
30	1.32	5	0.05	A
0	1.34	5	0.05	A
10	1.35	5	0.05	A
20	1.36	5	0.05	A
35	1.44	5	0.05	A
40	1.45	5	0.05	A

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XIX. **Prueba de Tukey para el contenido de sólidos solubles en función del tiempo**

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.	Agrupación
0	28.97	5	0.81	A
1	29.06	5	0.81	A
13	29.19	5	0.81	A
16	29.28	5	0.81	A
8	29.29	5	0.81	A
7	29.31	5	0.81	A
10	29.31	5	0.81	A
12	29.31	5	0.81	A
11	29.32	5	0.81	A
15	29.34	5	0.81	A
3	29.37	5	0.81	A
9	29.37	5	0.81	A
14	29.41	5	0.81	A
6	29.42	5	0.81	A
2	29.42	5	0.81	A
4	29.42	5	0.81	A
5	29.53	5	0.81	A
17	29.61	5	0.81	A
21	29.71	5	0.81	A
18	29.73	5	0.81	A
22	29.74	5	0.81	A
20	29.93	5	0.81	A
25	29.96	5	0.81	A
19	30.15	5	0.81	A
24	30.30	5	0.81	A
23	30.31	5	0.81	A
27	30.46	5	0.81	A
26	30.65	5	0.81	A
30	30.69	5	0.81	A
28	30.73	5	0.81	A
29	30.73	5	0.81	A
32	30.75	5	0.81	A
33	30.91	5	0.81	A
34	31.03	5	0.81	A
31	31.08	5	0.81	A
35	31.34	5	0.81	A
36	31.78	5	0.81	A
37	32.15	5	0.81	A
38	32.22	5	0.81	A
39	32.33	5	0.81	A
40	32.70	5	0.81	A

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

4.2. Modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo

En esta sección se presentan los modelos obtenidos para el contenido de sólidos solubles en función del tiempo, así como el resumen del análisis de regresión mediante: intervalos de confianza, criterio de Akaike, criterio bayesiano, error cuadrático medio de predicción, análisis de varianza de regresión, coeficiente de determinación, coeficiente de determinación ajustado, y contraste de hipótesis sobre los coeficientes de regresión.

Tabla XX. **Modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo**

	Variable independiente		Variable dependiente		Modelo	R ²	Rango de validez	Fuente
	Símbolo	Dimensional	Símbolo	Dimensional				
Modelo orden cero	t	min	B	%Brix	$B = 28.64 + 0.08t$	0.84	[0-40 min]	Figura 13
Modelo primer orden	t	min	B	%Brix	$B = 28.67e^{3.00 \times 10^{-3}t}$	0.85	[0-40 min]	Figura 13

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXI. **Resumen análisis de regresión para modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo**

Modelo	Variable	R ²	R ² aj	ECMP	AIC	BIC
Modelo orden cero	Agua evaporada (kg)	0.84	0.83	0.19	47.48	52.62
Modelo primer orden	Agua evaporada (kg)	0.85	0.84	2.00E ⁻⁰⁴	-234.94	-229.80

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXII. **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo cinético de orden cero**

Coefficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95 %)	T Student	p-valor	α	Hipótesis nula Ho
constante	28.64	0.13	28.38	28.89	226.94	<1.00x10 ⁻⁰⁴	0.05	Rechazada
Tiempo (min)	0.078	0.01	0.07	0.09	14.18	<1.00x10 ⁻⁰⁴	0.05	Rechazada

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXIII. **Análisis de varianza para modelo cinético de orden cero**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	34.03	1	34.03	201.03	4.09	Rechazada
Tiempo (min)	34.03	1	34.03	201.03		
Error	6.60	39	0.17			
Total	40.63	40				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXIV. **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo cinético de primer orden**

Coeficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95 %)	T Student	p-valor	α	Hipótesis nula Ho
constante	3.36	4.00×10^{-03}	3.35	3.364	832.80	$<1.00 \times 10^{-04}$	0.05	Rechazada
Tiempo (min)	3.00×10^{-03}	1.70×10^{-04}	2.00×10^{-03}	3.00×10^{-03}	14.56	$<1.00 \times 10^{-04}$	0.05	Rechazada

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXV. **Análisis de varianza para modelo cinético de primer orden**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	0.04	1	0.04	212.08	4.09	Rechazada
Tiempo (min)	0.04	1	0.04	212.08		
Error	0.01	39	1.70×10^{-04}			
Total	0.04	40				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

4.3. Modelos de agua evaporada en función del tiempo

En esta sección se presentan los modelos obtenidos para la cantidad de agua evaporada en función del tiempo, los resultados obtenidos de prueba de correlación lineal y el resumen del análisis de regresión mediante: intervalos de confianza, criterios AIC, BIC Y ECMP, análisis de varianza de regresión, coeficiente de determinación, coeficiente de determinación ajustado, y contraste de hipótesis sobre los coeficientes de regresión.

Tabla XXVI. **Modelos agua evaporada en función del tiempo**

	Variable independiente		Variable dependiente		Modelo	R ²	Rango de validez	Fuente
	Símbolo	Dimensional	Símbolo	Dimensional				
Lineal	t	min	B	%Brix	$B = -7.78 + 2.08t$	0.84	[0-40 min]	Figura 14
Polinomial orden dos	t	min	B	%Brix	$B = 10.96 - 0.81t + 0.07t^2$	0.96	[0-40 min]	Figura 14
Polinomial orden tres	t	min	B	%Brix	$B = 7.64 + 0.26t + 0.01t^2 + 1.00 \times 10^{-03}t^3$	0.96	[0-40 min]	Figura 14

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXVII. **Prueba de correlación lineal**

r	tr	tc	Hipótesis nula Ho
0.92	14.47	1.69	Rechazada

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXVIII. **Resumen análisis de regresión para modelos de la cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Modelo	Variable	R ²	R ² aj	ECMP	AIC	BIC
Lineal	Agua evaporada (kg)	0.84	0.84	133.79	315.90	321.04
Polinomial orden dos	Agua evaporada (kg)	0.96	0.95	39.88	265.10	271.95
Polinomial orden tres	Agua evaporada (kg)	0.96	0.96	39.20	264.20	272.77

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXIX. **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo lineal de cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Coefficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95 %)	T Student	p-valor	α	Hipótesis nula Ho
constante	-7.78	3.33	-14.51	-1.04	-2.33	0.03	0.05	Rechazada
Tiempo (min)	2.08	0.14	1.79	2.37	14.49	<1.00x10 ⁻⁰⁴	0.05	Rechazada

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXX. **Análisis de varianza para modelo lineal de cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F crítica	Hipótesis nula Ho
Modelo	24 761.10	1	24 761.10	209.85	4.09	Rechazada
Tiempo (min)	24 761.10	1	24 761.10	209.85		
Error	4 601.88	39	118.00			
Total	29 362.97	40				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXXI. **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo polinomial grado dos de cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Coefficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95 %)	T Student	p-valor	α	Hipótesis nula Ho
constante	10.96	2.58	5.74	16.19	4.25	1.00×10^{-04}	0.05	Rechazada
Tiempo (min)	-0.81	0.30	-1.41	-0.20	-2.70	0.01	0.05	Rechazada
Tiempo ² (min) ²	0.07	0.01	0.06	0.09	9.99	$<1.00 \times 10^{-04}$	0.05	Rechazada

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXXII. **Análisis de varianza para modelo polinomial grado dos de cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F critica	Hipótesis nula Ho
Modelo	28 093.47	2	14 046.74	420.46	3.25	Rechazada
Tiempo (min)	28 093.47	2	14 046.74	420.46		
Error	1 269.50	38	33.41			
Total	29 362.97	40				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXXIII. **Coefficientes de regresión y estadísticos asociados para modelo polinomial grado tres de cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Coefficiente	Est.	E.E.	LI (95 %)	LS (95 %)	T Student	p-valor	α	Hipótesis nula Ho
constante	7.64	3.23	1.09	14.19	2.36	0.02	0.05	Rechazada
Tiempo (min)	0.26	0.71	-1.18	1.69	0.36	0.72	0.05	Aceptada
Tiempo ² (min) ²	5.00x10 ⁻⁰³	0.04	-0.08	0.09	0.11	0.91	0.05	Aceptada
Tiempo ³ (min) ³	1.00x10 ⁻⁰³	7.00x10 ⁻⁰⁴	-3.00x10 ⁻⁰⁴	3.00x10 ⁻⁰³	1.65	0.11	0.05	Aceptada

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla XXXIV. **Análisis de varianza para modelo polinomial grado de cantidad de agua evaporada en función del tiempo**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Medias	F	F critica	Hipótesis nula Ho
Modelo	28 180.19	3	9 393.40	293.85	2.86	Rechazada
Tiempo (min)	28 180.19	3	9 393.40	293.85		
Error	1 182.78	37	31.97			
Total	29 362.97	40				

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El estudio sobre las diferentes propiedades de calidad de salsa de tomate en función del tiempo permite realizar el siguiente análisis.

5.1. Propiedades de calidad de salsa de tomate en función del tiempo

En la Figura 9, se observa gráficamente que la consistencia de la salsa de tomate disminuye con el tiempo de cocción desde un valor de 8.66 cm hasta 5.45 cm. El análisis de estadístico indica que para un nivel de confianza del 95 %, la consistencia varía de forma significativa con el tiempo de cocción y esta variabilidad de acuerdo con la prueba de Tukey se debe a la diferencia entre las medias entre los tiempos de cocción donde la variación más significativa se encuentra al inicio en tiempo cero y final en cuarenta minutos del proceso.

La consistencia depende de la variedad composicional del tomate, distribución del tamaño y forma de las partículas del material insoluble, el contenido de sólidos solubles y de la temperatura de rotura que produce inactivación enzimática, por lo que puede modificarse por medio del proceso de concentración. (Anthon et al., 2008; Hayes et al., 1998; Zhang et al., 2014)

Debido a la inactivación enzimática y el incremento del contenido de sólidos solubles durante el proceso, la consistencia de la salsa disminuye, dando como resultado un producto con la apariencia y consistencia deseada.

En la figura 10, se observa gráficamente que la viscosidad de la salsa de tomate incrementa su valor con el tiempo de cocción desde 2.89 Pa*s a 6.27 Pa*s.

La viscosidad de la salsa se relaciona con el incremento del contenido de sólidos solubles, la inactivación de enzimas y con una mayor energía suministrada durante la evaporación del proceso de concentración, dando como resultado un producto con mayor viscosidad. (Hassen et al., 2019)

El incremento del contenido de sólidos solubles y los efectos del proceso de calentamiento ocasionan que la viscosidad en la salsa de tomate aumente durante el proceso. El análisis estadístico de la prueba ANOVA, así como la prueba de Tukey, indican que para un nivel de confianza del 95 %, la viscosidad varía de forma significativa con el tiempo de cocción.

Se observa que el pH en la figura 11 incrementa ligeramente su valor del tiempo inicial hasta los diez minutos del proceso de 3.66 a 3.71 y luego disminuye hasta estabilizar su valor a un pH de 3.58. Así mismo el pH se mantiene en valores bajos menores al 4.30 lo cual impide el crecimiento los microorganismos patógenos. (Ramírez-Rosas et al., 2019)

De acuerdo con Hassen, y colaboradores (2019) estas fluctuaciones de pH observadas pueden deberse a variaciones de la acidez titulable y a la temperatura durante el proceso.

La figura 12 muestra que el porcentaje de acidez incrementa su valor durante el proceso desde un valor inicial de 1.34 % a 1.36 % a los veinte minutos, presenta una disminución de su valor a 1.32 % a los treinta minutos de

procesamiento y luego incrementa su valor nuevamente hasta alcanzar un valor de 1.45 % a los cuarenta minutos.

El grado de acidez depende de los ácidos presentes en el tomate y la disminución de la acidez se atribuye principalmente al aumento de la actividad del ácido cítrico. Así mismo, esta puede cambiar durante los procesos térmicos debido a que la calidad de los ácidos orgánicos disminuye y también debido a que los procesos de evaporación inhiben la actividad enzimática retrasando la pérdida de ácidos orgánicos en reacciones enzimáticas.

Según el análisis de varianza y la prueba de Tukey, para un nivel de confianza del 95 %, los valores de pH y el porcentaje de acidez no se ven afectados de forma significativa con el tiempo de cocción de la salsa.

En la figura 13 se observa que el contenido de sólidos solubles en función del tiempo incrementa su valor con el tiempo de cocción desde un valor de 29.00 % Brix hasta 32.70 % Brix, lo cual incrementa la viscosidad y mejora la consistencia de la salsa.

Durante el proceso de cocción, se realiza la concentración de la salsa de tomate, lo cual ocasiona un aumento en el contenido de sólidos solubles debido a la disminución de la cantidad de agua presente y a la evaporación de otros componentes volátiles. (Ordóñez-Santos et al., 2008)

El ANOVA, así como la prueba de Tukey indican que el incremento de sólidos solubles está relacionado con el tiempo de cocción para un nivel de confianza del 95 %.

5.2. Modelos cinéticos del contenido de sólidos solubles en función del tiempo

En la figura 13 se observa que el contenido de sólidos solubles en función del tiempo incrementa su valor con el tiempo de cocción desde 29.00 % Brix hasta 32.70 % Brix.

Los modelos obtenidos se presentan en las tablas XX y XXI se presenta un resumen del análisis de regresión para ambos modelos.

El coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de determinación ajustado R^2_{aj} permiten evaluar la calidad de ajuste del modelo, estos toman valores entre 0 y 1 donde un valor cercano a 1 implica que buena parte de la varianza es explicada por la recta de regresión. De acuerdo con esto, ambos modelos presentan un buen ajuste y la diferencia entre los valores de R^2 y los valores de R^2_{aj} es mínima entre ambos modelos, sin embargo, el modelo de primer orden presenta un valor más alto tanto de R^2 como de R^2_{aj} .

Los criterios de información AIC, BIC, y ECMP permiten determinar qué modelo se ajusta mejor a los datos. Los modelos que presentan el valor más bajo de AIC, BIC y ECMP se consideran como los mejores. Se observa que el modelo cinético de primer orden presenta menores valores de AIC, BIC y ECMP en comparación con el modelo de orden cero.

Se observa que para ambos modelos cinéticos se rechaza la hipótesis nula por lo que hay una cantidad significativa de variación en la respuesta justificada por el modelo postulado. (Walpole et al.,2012) Por lo tanto, ambos modelos son útiles para predecir la relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo.

Para los estimadores de los modelos se realizó una prueba de hipótesis, así mismo se obtuvieron los intervalos de confianza.

Se observa que para el modelo de orden cero y de primer orden se rechaza la hipótesis nula para ambos estimadores β_0 y β_1 y se concluye para un nivel de significancia del 0.05 que ambos estimadores son distintos de cero por lo que la relación entre el contenido de sólidos solubles y el tiempo se puede describir mediante ambos modelos propuestos.

Los intervalos de confianza para el modelo de orden cero son IC 95 % β_0 (28.38,28.89) y IC 95 % β_1 (0.01,0.09) y para el modelo de primer orden de IC 95 % β_0 (3.35,3.36) y IC 95 % β_1 (2.00×10^{-03} , 3.00×10^{-03}).

Como ninguno incluye el cero, esto habla de forma positiva sobre la significancia estadística. (Aparicio et al., s.f.) Por lo que tanto el modelo de orden cero como de primer orden predicen la relación entre el contenido de sólidos solubles mediante los modelos propuestos con intercepción y pendientes significativamente distintas de cero.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado, ambos modelos son adecuados para describir el comportamiento del contenido de sólidos solubles en función del tiempo. Sin embargo, de acuerdo con los criterios de selección, el modelo que mejor se ajusta es el modelo cinético de primer orden.

5.3. Modelos de evaporación de agua en función del tiempo

En la figura 14 se observa que la cantidad de agua evaporada se incrementa con el tiempo, esto debido a la evaporación de agua producida durante el proceso.

Con el objetivo de obtener un modelo que describiera adecuadamente el comportamiento de la cantidad de agua evaporada en función del tiempo se realizó la evaluación de varios modelos, uno lineal y dos polinomiales de grado dos y tres respectivamente los cuales se presentan en la tabla XXVI. Estos modelos fueron seleccionados al analizar el comportamiento gráfico de la cantidad de agua evaporada en función del tiempo y utilizando como referencia el trabajo realizado por Ha y Thuy (2020).

Para el modelo lineal en la prueba de correlación de Pearson, se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que el comportamiento de la cantidad de agua evaporada y el tiempo se puede describir mediante un modelo lineal.

Como se mencionó anteriormente el coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de determinación ajustado R^2_{aj} permiten evaluar la calidad de ajuste del modelo. Los tres modelos presentan un buen ajuste ya que presentan valores elevados de R^2 y de R^2_{aj} . Aunque el modelo polinomial de grado tres presenta los valores más altos con un R^2 de 0.96 y de R^2_{aj} de 0.96, la diferencia entre estos valores con el modelo polinomial de grado dos para el cual se tiene un R^2 de 0.96 y un R^2_{aj} de 0.95, es mínima para el coeficiente de determinación ajustado y ninguna para el coeficiente de determinación. De igual forma los resultados indican que los modelos polinomiales se ajustan mejor que el modelo lineal al comportamiento de los datos para el cual se tienen valores de R^2 de 0.84 y para R^2_{aj} de 0.84.

De acuerdo con los estimadores AIC, BIC y ECMP, el modelo polinomial de grado tres presenta los valores más bajos, en comparación con el modelo lineal y polinomial de grado dos.

Sin embargo, se observa que la diferencia entre estos criterios para el modelo polinomial de grados dos y tres es mínima ya que el modelo polinomial de grado dos presenta valores de AIC de 265.10, BIC de 271.95, ECMP de 39.88; y el modelo polinomial de orden tres de AIC de 264.20, BIC de 272.77, ECMP de 39.20.

Se observa que para los tres modelos se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que la relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo se explica significativamente con los modelos ajustados.

Para las pruebas de hipótesis sobre los estimadores de los modelos se observa que, para los modelos propuestos de agua evaporada en función del tiempo, se rechaza la hipótesis nula para los estimadores β_0 y β_1 del modelo lineal, para los estimadores β_0 , β_1 y β_2 del modelo polinomial de grado dos y para el estimador β_0 del modelo polinomial de grado tres.

Por lo que se concluye que con un nivel de significancia del 0.05 para el modelo lineal y polinomial grado dos, debido a que todos los estimadores son distintos de cero, la relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo se puede describir con estos modelos sin embargo el modelo más adecuado es el modelo polinomial de grado dos.

En el modelo polinomial de grado tres para los estimadores β_1 , β_2 y β_3 debido a que se acepta la hipótesis nula, esto indica que no hay evidencia suficiente para concluir que existe una correlación distinta de cero.

Para los intervalos de confianza del modelo lineal y polinomial de grado dos, se observa que ninguno incluye el cero por lo que ambos modelos permiten predecir el comportamiento de la cantidad de agua evaporada en función del tiempo. En el modelo polinomial de grado tres se observa que para los estimadores β_1 , β_2 y β_3 , los intervalos de confianza incluyen el cero lo cual indica que no hay relación significativa entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo para este modelo.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado, según los criterios R^2 , R^2_{aj} , AIC, BIC y ECMP, al igual que el análisis de varianza, el modelo que mejor describe la relación entre la cantidad de agua evaporada y el tiempo es el modelo polinomial de grado tres, seguido por el modelo polinomial de grado dos con una diferencia mínima.

Sin embargo, de acuerdo con los intervalos de confianza y las pruebas realizadas a los estimadores, el modelo polinomial de grado dos se considera el más adecuado para describir el comportamiento de los datos de agua evaporada en función del tiempo para el proceso de cocción de salsa de tomate.

CONCLUSIONES

1. La consistencia de la salsa disminuye su valor durante el proceso de cocción y la viscosidad aumenta debido al incremento del contenido de sólidos solubles proporcionando la calidad deseada para el producto.
2. El pH y el porcentaje de acidez de la salsa se mantienen en los parámetros adecuados para inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos.
3. El contenido de sólidos solubles al igual que la cantidad de agua evaporada aumentan con el tiempo debido a la evaporación de agua que se origina en el proceso de cocción.
4. Las propiedades de calidad de pH y porcentaje de acidez no varían de forma significativa con el tiempo de cocción, sin embargo, la viscosidad, el contenido de sólidos solubles y consistencia de la salsa de tomate presentan variación significativa con el tiempo de cocción, con un nivel de significancia del 95 %.
5. Los modelos cinéticos de orden cero y primer orden se ajustan al comportamiento de las variables de contenido de sólidos solubles y tiempo, pero el modelo que describe mejor la relación entre ambas variables es el modelo cinético de primer orden.
6. Los modelos lineal y polinomial de grado dos se ajustan adecuadamente para describir la relación entre la cantidad de agua evaporada en función del tiempo de cocción de la salsa de tomate, sin embargo, el modelo que

presenta un mayor ajuste de acuerdo con el análisis estadístico realizado es el modelo polinomial de grado dos.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar las propiedades de calidad de salsa de tomate en función de la temperatura del proceso de cocción.
2. Realizar un estudio para determinar un modelo que describa la relación entre las variables de viscosidad, consistencia, pH, acidez y contenido de sólidos solubles en función del tiempo de procesamiento.
3. Aplicar la metodología utilizada para evaluar las propiedades de calidad, así como obtener modelos cinéticos para el contenido de sólidos solubles y agua evaporada para las otras líneas de producción de salsas que contienen tomate.
4. Implementar más controles de calidad durante el proceso de cocción para mejorar la calidad del producto final
5. Evaluar las propiedades de calidad y obtener modelos cinéticos que describan la relación entre la cantidad de agua evaporada y el contenido de sólidos solubles en función del tiempo para otros productos de concentrados de frutas y vegetales.

REFERENCIAS

1. Anthon, G. E., Diaz, J. V., & Barrett, D. M. (2008). Changes in pectins and product consistency during the concentration of tomato juice to paste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(16), 7100–7105. doi: 10.1021/jf8008525.
2. Aparicio, J., Martínez, M. A., & Morales, J. (s.f.) *Modelos Lineales Aplicados en R*.
3. AOAC (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*.
4. ASTM (2020). *ASTM D2196 Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer*.
5. ASTM (2019). *ASTM F1080-93 Standard Test Method for Determining the Consistency of Viscous Liquids Using a Consistometer*.
6. Brito, G. (2019). *Procesamiento de Alimentos: ¿Qué es y su Importancia?*. Recuperado de <https://www.metalboss.com.mx/procesamiento-de-alimentos>.
7. Brizuela., & Romano. (s.f.) *Unidad IV Cinética Química*. Recuperado de <http://materias.fi.uba.ar/6730/Tomo1Unidad4.pdf>.

8. Calderón, G. (2019). *Reología*. Recuperado de <https://www.euston96.com/reologia/>.
9. Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006) *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
10. Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa Fundamentos y Aplicaciones*. México: McGraw-Hill.
11. Chacón-Holguín, R., J., Gamboa-Álvarez, R., J., & Candellas-Cadillo, G., M. (2019). Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Propiedades Físicoquímicas y Contenido de Carotenoides Totales de Tres Variedades de Tomate (*Lycopersicon esculentum*) Cultivadas con Diferentes Niveles de Potasio . *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*. 4, 450–455. Recuperado de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/3/62.pdf>.
12. Chavez, K. (2015). *Tipos y equipos de evaporadores*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/krinashavz/tipos-y-equipos-de-evaporadores>.
13. Ciruelos, et al. (2008). *Parámetros de calidad en el tomate para industria*. Recuperado de https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/eia/archivos/iag/2007/2007_09%20Parametros%20de%20calidad%20en%20el%20tomate%20para%20industria.pdf.

14. CODEX ALIMENTARIUS. (2013). *Norma para el concentrado de tomate elaborado CODEX STAN57-1981**. Recuperado de http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B57-1981%252FCXS_057s.pdf.
15. da Silva R., V., & de Moraes J., D. (2019). *Review Heat Transfer of Non-Newtonian Fluids in Agitated Tanks. En Heat and Mass Transfer - Advances in Science and Technology Applications*. Recuperado de <https://doi.org/10.5772/intechopen.85254>.
16. Dhumal, S. S., Karale, A. R., More, T. A., Nimbalkar, C. A., Chavan, U. D., & Jadhav, S. B. (2015). Preparation of pomegranate juice concentrate by various heating methods and appraisal of its physicochemical characteristics. *Acta Horticulturae*, 1089(65), 473–484. doi: 10.17660/ActaHortic.2015.1089.65.
17. Di Rienzo, J., Balzarini, M., Robledo, C., Casanoves, F., Gonzales, L., & Tablada, E. (2008). *InfoStat Software manual del usuario*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/283491340_Infostat_manual_del_usuario.
18. DRAFT MALAWI STANDARD. (2018). *Tomato sauce and ketchup – Specification*. Recuperado de http://www.puntofocal.gov.ar/notific_otros_miembros/mwi33_t.pdf.
19. FAO. (2009). *Fruit and Vegetable Processing*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/al177e/al177e.pdf>.

20. Food Safety and Standards Authority of India. (2016). *Manual of Methods of Analysis of Foods. Fruit and Vegetable Products*. Recuperado de https://fssai.gov.in/upload/advisories/2018/02/5a93eb03851bbManual_Fruits_Veg_25_05_2016.pdf.
21. Foust, A. F., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., & Andersen L.B. (2006). *Principios de Operaciones Unitarias*. México: CECSA.
22. Franco, D. (s.f.). *Tomate industrial Cadenas Alimentarias*. alimentos argentinos. Recuperado de <http://www.alimentosargentinos.gov.ar/HomeAlimentos/Conservas%20Vegetales/conservas/productos/TomateIndustria/2005/TomateIndustria.htm>.
23. Geankoply, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones*. México: CECSA.
24. Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill.
25. Ha, H. T. N., & Thuy, N. M. (2020). Kinetic study of water and total soluble solid changes of black cherry tomato (*Solanum lycopersicum* cv. og) sauce using rotary vacuum evaporation. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 8(3), 1037–1045. doi: 10.12944/CRNFSJ.8.3.30.
26. Hackett, B. W. (2018). The essentials of continuous evaporation. *Chemical Engineering Progress*, 114(5), 24–28. Recuperado de <https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20180524.pdf>.

27. Hassen, Y., Gebre, H., & Haile, A. (2019). Effects of Pre-Heating and Concentration Temperatures on Physico-Chemical Quality of Semi Concentrated Tomato (*Solanum lycopersicum*) Paste. *J Food Process Technol*, 10(5), 1-6. doi: 10.4172/2157-7110.1000795.
28. Hayes, W. A., Smith, P. G., & Morris, A. E. J. (1998). The Production and Quality of Tomato Concentrates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 38(7), 537–564. doi: 10.1080/10408699891274309.
29. Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. México: CECSA.
30. Kubo, M. T. K., Rojas, M. L., Miano, A. C., & Augusto, P. E. D. (2019). Chapter 1 Rheological Properties of Tomato Products. En *Tomato Chemistry Industrial Processing and Product Development*. doi: 10.1039/9781788016247-00001.
31. Lara, A. (2018). *Guía de salsas madres y derivadas*. Recuperado de <https://pomanazono.jimdofree.com>.
32. Levine, N. (2014) *Principios de Fisicoquímica*. México: McGraw Hill Education.
33. López O., M. J., Ramos, R., & Pino C., J. (1985). Comparación de Tres Métodos para la Obtención de Salsa de Tomate. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 38(2), 99-106. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/28323>.

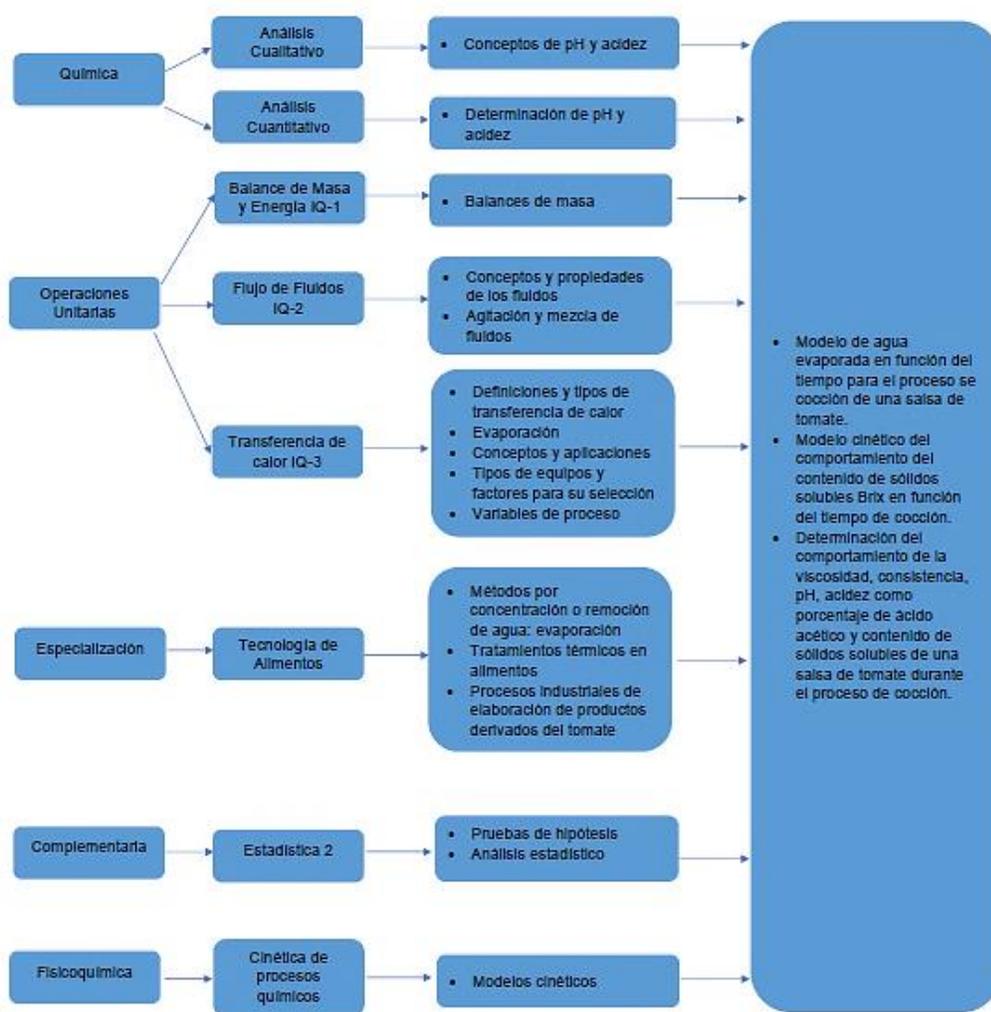
34. MachinePoint. (s.f.) *El procesado de tomate Concentrado de tomate, salsa, kétchup Tomates pelados y cortados*. Recuperado de [https://www.machinepoint.com/machinepoint/WebCont.nsf/IDCatalogs/3000111/\\$FILE/tomato%20processingesp%20\(small\).pdf](https://www.machinepoint.com/machinepoint/WebCont.nsf/IDCatalogs/3000111/$FILE/tomato%20processingesp%20(small).pdf).
35. Macías, S., & Pincay, C. (2012). *Construcción de Software para Regresión el Caso de Selección del Modelo y Pruebas de Homocedasticidad*. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/21486/1/Resumen%20MACIAS%20%20PINCAY%20FINAL.pdf>.
36. McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (1991) *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. España: McGraw-Hill.
37. Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
38. Noale, N. (2015). *Tomate para industria: revisión bibliográfica y selección de variedades en el valle medio de río negro*. Recuperado de <http://lipa.agro.unlp.edu.ar/wpcontent/uploads/sites/29/2020/03/Traabajo-Final-Noale.pdf>.
39. Ordóñez-Santos, L. E., Arbones, E., Vázquez-Oderiz, L., Romero-Rodríguez, A., Gómez, J., & López, M. (2008). Use of physical and chemical properties of commercial tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) products for monitoring their quality. *Journal of AOAC International*, 91(1), 112–122. Recuperado doi: 10.1093/jaoac/91.1.112.

40. Perry, R. H. (1984). *Manual del Ingeniero Químico*. México: McGraw Hill.
41. Ramírez-Rosas, J., Gómez-Salazar, J., Abraham-Juárez, M. del R., & Cerón-García, A. (2019). Evaluación Físicoquímica de la calidad en salsas de tomate (Cátsup). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos significa*, 4(1), 307–316. Recuperado de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume4/4/3/41.pdf>.
42. Sandra, L., & Noguera, R. (2007). Comparación de modelos matemáticos : una aplicación en la evaluación de alimentos para animales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, 141–148.
43. Streeter, V. L. Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (2000). *Mecánica de fluidos*. Colombia: McGraw-Hill.
44. Thakur, B.R., Singh, R.K., & Nelson, P.E. (1996). Quality Attributes of processed tomato products: A review. *Purdue Agricultural Research Programs*. 12(3), 375-401. Recuperado de <https://ucanr.edu/datastoreFiles/608-1172.pdf>.
45. Triola, M. F. (2004) *Estadística*. México: PEARSON Educación.
46. UAM. (s.f.). *Cinética Química*. Recuperado de <http://www.qfa.uam.es/labqui/presentaciones/Tema4.pdf>.
47. UNEFM. (s.f.) *Unidad I. Cinética Química Avanzada*. Recuperado de <https://reaccionesunefm.files.wordpress.com/2009/05/metodo-integral-hasta-vida-fraccionaria.pdf>.

48. Valenzuela, M. (2018) *Caracterización económica de la cadena agroalimentaria del tomate de uso industria*. Recuperado de https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/02/TomateIndustrial_2018.pdf.
49. Velazques, Y. (2020). *Control de calidad de la salsa de tomate. Determinación de sólidos solubles por refractometría*. Recuperado de <https://hive.blog/hive-196387/@yusvelasquez/control-de-calidad-de-la-salsa-de-tomate-determinacion-de-sólidos-solubles-por-refractometria>.
50. Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012) *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: PEARSON Educación.
51. WPTC (2021). *WPTC World production estimate of tomatoes for processing (in 1000 metric tonnes)*. Recuperado de <https://www.wptc.to/pdf/releases/WPTC%20world%20production%20estimate%20as%20of%202022%20Feburary%202021.pdf>.
52. Xu, Q., Adyatni, I., & Reuhs, B. (2018). Effect of Processing Methods on the Quality of Tomato Products. *Food and Nutrition Sciences*, 09(02), 86–98. doi: 10.4236/fns.2018.92007.
53. Zhang, L., Schultz, M. A., Cash, R., Barrett, D. M., & McCarthy, M. J. (2014). Determination of quality parameters of tomato paste using guided microwave spectroscopy. *Food Control*, 40(1), 214–223. doi: 10.1016/j.foodcont.2013.12.008.

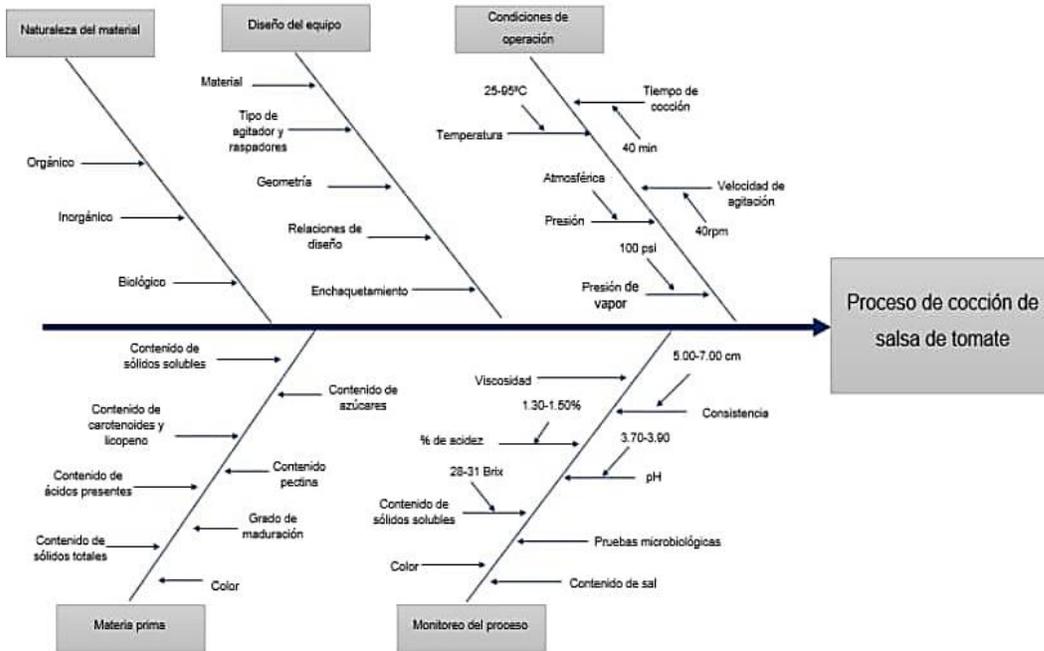
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



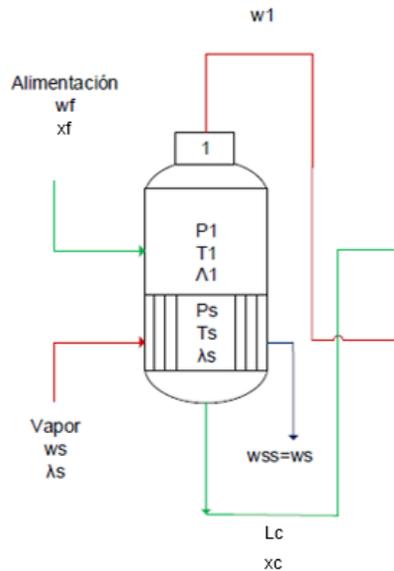
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 3. Balance de masa evaporador simple



Balance de masa

$$wf = Lc + ws$$

$$wf * xf = Lc * xc + ws * 0$$

$$wf * xf = Lc * xc$$

Donde:

ws: Agua evaporada kg

wf: Alimentación kg

xf: Concentración de salsa inicial

xc: Concentración de salsa final

Lc: Salsa concentrada kg

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Apéndice 4. **Datos originales Contenido de sólidos solubles en función del tiempo**

Tiempo (min)	%Brix				
	1	2	3	4	5
0	28.00	28.30	28.20	32.20	28.20
1	28.00	28.40	28.20	32.50	28.20
2	29.00	28.40	28.40	32.70	28.60
3	28.90	28.40	28.30	32.70	28.50
4	28.80	28.50	28.80	32.30	28.70
5	28.70	28.40	29.20	32.60	28.80
6	28.30	28.40	29.40	32.30	28.70
7	28.50	28.40	28.70	32.40	28.50
8	28.30	28.50	28.80	32.30	28.50
9	28.70	28.50	28.80	32.20	28.70
10	28.70	28.20	28.40	32.80	28.40
11	28.50	28.80	28.20	32.60	28.50
12	28.60	28.60	28.50	32.30	28.60
13	28.00	28.90	28.20	32.50	28.40
14	28.50	28.90	28.60	32.40	28.70
15	28.40	28.80	28.30	32.70	28.50
16	28.20	28.60	28.70	32.40	28.50
17	28.20	28.80	29.30	33.00	28.80
18	28.50	28.50	29.90	32.80	29.00
19	28.50	29.20	30.30	33.40	29.30
20	28.10	29.20	30.20	33.00	29.20
21	28.10	28.70	29.80	33.10	28.90
22	28.20	28.60	29.60	33.50	28.80
23	28.90	28.70	30.70	33.80	29.40
24	28.40	29.60	30.20	33.90	29.40
25	28.10	29.10	29.80	33.80	29.00
26	28.20	30.50	30.90	33.80	29.90
27	28.10	30.50	30.20	33.90	29.60
28	28.20	30.50	31.20	33.80	30.00
29	28.20	31.50	30.50	33.40	30.10
30	28.30	30.30	31.20	33.70	29.90
31	28.10	32.10	31.00	33.80	30.40
32	28.90	31.30	29.90	33.60	30.00
33	28.20	31.80	30.70	33.60	30.20
34	28.70	32.70	29.60	33.80	30.30
35	28.90	32.70	30.80	33.50	30.80
36	31.40	31.40	31.10	33.70	31.30
37	31.80	31.80	31.70	33.70	31.80
38	32.00	32.00	31.70	33.50	31.90
39	32.00	32.00	31.90	33.80	32.00
40	31.60	32.60	32.10	35.10	32.10

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 5. Datos originales consistencia en función del tiempo

Tiempo (min)	Consistencia (cm)				
	1	2	3	4	5
0	6.80	9.00	10.30	8.50	8.70
10	6.30	8.30	9.00	8.50	7.90
20	5.80	7.10	8.20	8.00	7.00
30	5.40	6.80	7.00	6.60	6.40
35	5.00	6.20	6.80	5.00	6.00
40	5.00	5.50	6.10	5.10	5.50

Fuente: elaboración propia, mediante programa Microsoft Excel.

Apéndice 6. Datos originales viscosidad en función del tiempo

Tiempo (min)	Viscosidad (Pa*s)				
	1	2	3	4	5
0	3.93	1.99	2.43	3.31	2.78
10	4.91	2.16	3.31	3.39	3.46
20	5.92	2.68	3.71	3.65	4.11
30	8.99	2.60	5.03	5.03	5.54
35	9.70	3.15	5.06	6.39	5.97
40	9.60	3.65	5.40	6.49	6.22

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 7. Datos originales pH en función del tiempo

Tiempo (min)	pH				
	1	2	3	4	5
0	3.62	3.66	3.81	3.52	3.70
10	3.60	3.66	3.81	3.81	3.69
20	3.42	3.62	3.75	3.76	3.60
30	3.43	3.63	3.73	3.70	3.60
35	3.43	3.61	3.67	3.63	3.57
40	3.43	3.60	3.66	3.65	3.56

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 8. Datos originales porcentaje de acidez en función del tiempo

Tiempo (min)	% Acidez				
	1	2	3	4	5
0	1.44	1.20	1.26	1.50	1.30
10	1.44	1.23	1.26	1.53	1.31
20	1.44	1.20	1.32	1.50	1.32
30	1.44	1.20	1.26	1.41	1.30
35	1.44	1.35	1.50	1.50	1.43
40	1.59	1.32	1.44	1.47	1.45

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 9. Datos originales peso inicial salsa

Repetición	1	2	3	4	5
Peso inicial salsa (kg)	870.00	870.00	870.00	870.00	870.00

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 10. **Datos calculados consistencia promedio en función del tiempo**

Tiempo (min)	Consistencia (cm)
0	8.66
10	7.98
20	7.23
30	6.44
35	5.80
40	5.45

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 11. **Datos calculados viscosidad promedio en función del tiempo**

Tiempo (min)	Viscosidad (Pa*s)
0	2.89
10	3.45
20	4.01
30	5.44
35	6.05
40	6.27

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 12. **Datos calculados pH promedio en función del tiempo**

Tiempo (min)	pH
0	3.66
10	3.71
20	3.63
30	3.62
35	3.58
40	3.58

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 13. **Datos calculados porcentaje de acidez promedio en función del tiempo**

Tiempo (min)	% Acidez
0	1.34
10	1.35
20	1.36
30	1.32
35	1.44
40	1.45

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 14. **Datos calculados Contenido de sólidos solubles promedio en función del tiempo**

Tiempo (min)	%Brix
0	29.00
1	29.10
2	29.40
3	29.40
4	29.40
5	29.50
6	29.40
7	29.30
8	29.30
9	29.40
10	29.30
11	29.30
12	29.30
13	29.20
14	29.40
15	29.30
16	29.30
17	29.60
18	29.70
19	30.10
20	29.90
21	29.70
22	29.70
23	30.30
24	30.30
25	30.00
26	30.70
27	30.50
28	30.70
29	30.70
30	30.70
31	31.10
32	30.70
33	30.90
34	31.00
35	31.30
36	31.80
37	32.20
38	32.20
39	32.30
40	32.70

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 15. Datos calculados agua evaporada en función del tiempo

Tiempo (min)	Agua evaporada (kg)					Promedio
	1	2	3	4	5	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	3.06	0.00	8.03	11.18	4.45
2	30.00	3.06	6.13	13.30	13.18	13.13
3	27.09	3.06	3.07	13.30	11.18	11.54
4	24.17	6.11	18.13	2.69	16.17	13.45
5	21.22	3.06	29.79	10.67	18.15	16.58
6	9.22	3.06	35.51	2.69	16.17	13.33
7	15.26	3.06	15.16	5.37	11.18	10.01
8	9.22	6.11	18.13	2.69	11.18	9.47
9	21.22	6.11	18.13	0.00	15.17	12.12
10	21.22	-3.09	6.13	15.91	8.16	9.67
11	15.26	15.10	0.00	10.67	10.18	10.24
12	18.25	9.13	9.16	2.69	12.18	10.28
13	0.00	18.06	0.00	8.03	6.13	6.45
14	15.26	18.06	12.17	5.37	15.17	13.21
15	12.25	15.10	3.07	13.30	10.18	10.78
16	6.17	9.13	15.16	5.37	10.18	9.20
17	6.17	15.10	32.66	21.09	18.15	18.63
18	15.26	6.11	49.46	15.91	24.03	22.16
19	15.26	26.82	60.30	31.26	34.60	33.65
20	3.10	26.82	57.62	21.09	29.83	27.69
21	3.10	12.13	46.71	23.66	21.10	21.34
22	6.17	9.13	41.15	33.76	19.13	21.87
23	27.09	12.13	70.85	41.18	37.44	37.74
24	12.25	38.21	57.62	43.63	36.50	37.64
25	3.10	23.92	46.71	41.18	25.00	27.98
26	6.17	62.75	76.02	41.18	49.52	47.13
27	3.10	62.75	57.62	43.63	42.13	41.84
28	6.17	62.75	83.65	41.18	52.26	49.20
29	6.17	88.38	65.61	31.26	54.98	49.28
30	9.22	57.43	83.65	38.72	51.35	48.07
31	3.10	102.99	78.58	41.18	63.91	57.95
32	27.09	83.39	49.46	36.25	54.07	50.05
33	6.17	95.75	70.85	36.25	59.47	53.70
34	21.22	117.06	41.15	41.18	62.14	56.55
35	27.09	117.06	73.44	33.76	74.38	65.15
36	94.20	85.89	81.13	38.72	87.09	77.41
37	103.96	95.75	96.06	38.72	98.59	86.62
38	108.75	100.59	96.06	33.76	101.82	88.20
39	108.75	100.59	100.91	41.18	103.42	90.97
40	99.11	114.75	105.70	71.88	106.60	99.61

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 16. **Análisis estadístico para el contenido de sólidos solubles
en función del tiempo**

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Brix	205	0.273	0.095	6.024

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	203.167	40	5.079	1.537	0.0328
Tiempo	203.167	40	5.079	1.537	0.0328
Error	542.041	164	3.305		
Total	745.208	204			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.49782

Error: 3.3051 gl: 164

Tiempo Medias n E.E.

0	28.973	5	0.813	A
1	29.060	5	0.813	A
13	29.193	5	0.813	A
16	29.280	5	0.813	A
8	29.287	5	0.813	A
7	29.307	5	0.813	A
10	29.307	5	0.813	A
12	29.313	5	0.813	A
11	29.320	5	0.813	A
15	29.340	5	0.813	A
3	29.367	5	0.813	A
9	29.373	5	0.813	A
14	29.413	5	0.813	A
6	29.420	5	0.813	A
2	29.420	5	0.813	A
4	29.420	5	0.813	A
5	29.533	5	0.813	A
17	29.613	5	0.813	A
21	29.713	5	0.813	A
18	29.733	5	0.813	A
22	29.740	5	0.813	A
20	29.933	5	0.813	A
25	29.960	5	0.813	A
19	30.147	5	0.813	A
24	30.300	5	0.813	A
23	30.307	5	0.813	A
27	30.460	5	0.813	A
26	30.453	5	0.813	A
30	30.687	5	0.813	A
28	30.733	5	0.813	A
29	30.733	5	0.813	A
32	30.747	5	0.813	A
33	30.907	5	0.813	A
34	31.027	5	0.813	A
31	31.080	5	0.813	A
35	31.340	5	0.813	A
36	31.780	5	0.813	A
37	32.153	5	0.813	A
38	32.220	5	0.813	A
39	32.333	5	0.813	A
40	32.700	5	0.813	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 17. **Análisis estadístico consistencia en función del tiempo**

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Consistencia (cm)	30	0.674	0.606	12.894

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	39.503	5	7.901	9.908	<0.0001
Tiempo (min)	39.503	5	7.901	9.908	<0.0001
Error	19.138	24	0.797		
Total	58.641	29			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.74624

Error: 0.7974 gl: 24

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.
40	5.447	5	0.399 A
35	5.800	5	0.399 A B
30	6.440	5	0.399 A B C
20	7.227	5	0.399 B C D
10	7.980	5	0.399 C D
0	8.660	5	0.399 D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 18. **Análisis estadístico viscosidad en función del tiempo**

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Viscosidad (Pa*s)	30	0.406	0.283	37.559

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	50.905	5	10.181	3.287	0.0211
Tiempo (min)	50.905	5	10.181	3.287	0.0211
Error	74.326	24	3.097		
Total	125.232	29			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.44133

Error: 3.0969 gl: 24

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.
0	2.888	5	0.787 A
10	3.445	5	0.787 A
20	4.014	5	0.787 A
30	5.439	5	0.787 A
35	6.055	5	0.787 A
40	6.272	5	0.787 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 19. Análisis estadístico pH en función del tiempo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	30	0.187	0.018	2.977

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.065	5	0.013	1.107	0.3826
Tiempo (min)	0.065	5	0.013	1.107	0.3826
Error	0.280	24	0.012		
Total	0.345	29			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.21134

Error: 0.0117 gl: 24

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.
40	3.581	5	0.048 A
35	3.582	5	0.048 A
30	3.617	5	0.048 A
20	3.629	5	0.048 A
0	3.661	5	0.048 A
10	3.714	5	0.048 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 20. Análisis estadístico porcentaje de acidez en función del tiempo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
% Acidez	30	0.222	0.061	7.774

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.079	5	0.016	1.374	0.2691
Tiempo (min)	0.079	5	0.016	1.374	0.2691
Error	0.276	24	0.011		
Total	0.354	29			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.20954

Error: 0.0115 gl: 24

Tiempo (min)	Medias	n	E.E.
30	1.322	5	0.048 A
0	1.340	5	0.048 A
10	1.354	5	0.048 A
20	1.356	5	0.048 A
35	1.444	5	0.048 A
40	1.454	5	0.048 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 21. Análisis estadístico y de regresión modelo cinético de orden cero

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Brix	41	0.838	0.833	0.192	47.479	52.620

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	28.639	0.126	28.383	28.894	226.938	<0.0001		
Tiempo	0.077	0.005	0.066	0.088	14.179	<0.0001	201.034	1.000

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	34.031	1	34.031	201.034	<0.0001
Tiempo	34.031	1	34.031	201.034	<0.0001
Error	6.602	39	0.169		
Total	40.633	40			

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 22. Análisis estadístico y de regresión modelo cinético de primer orden

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
LN Brix	41	0.845	0.841	2.0E-04	-234.942	-229.801

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	3.356	0.004	3.348	3.364	832.845	<0.0001		
Tiempo	0.003	1.7E-04	0.002	0.003	14.563	<0.0001	212.080	1.000

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.037	1	0.037	212.080	<0.0001
Tiempo	0.037	1	0.037	212.080	<0.0001
Error	0.007	39	1.7E-04		
Total	0.043	40			

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 23. Análisis estadístico y de regresión modelo lineal

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Agua evaporada (kg)	41	0.843	0.839	133.786	315.900	321.040

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-7.775	3.332	-14.514	-1.035	-2.333	0.0249		
Tiempo (min)	2.077	0.143	1.787	2.367	14.486	<0.0001	209.845	1.000

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	24761.095	1	24761.095	209.845	<0.0001
Tiempo (min)	24761.095	1	24761.095	209.845	<0.0001
Error	4601.878	39	117.997		
Total	29362.973	40			

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 24. **Análisis estadístico y de regresión modelo polinomial grado dos**

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Agua evaporada (kg)	41	0.957	0.954	39.879	265.098	271.952

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	10.961	2.581	5.736	16.186	4.247	0.0001		
Tiempo (min)	-0.805	0.299	-1.410	-0.201	-2.698	0.0103	8.280	15.311
Tiempo (min)^2	0.072	0.007	0.057	0.087	9.987	<0.0001	100.748	15.311

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28093.471	2	14046.735	420.461	<0.0001
Tiempo (min)	24761.095	1	24761.095	741.174	<0.0001
Tiempo (min)^2	3332.376	1	3332.376	99.748	<0.0001
Error	1269.502	38	33.408		
Total	29362.973	40			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28093.471	2	14046.735	420.461	<0.0001
Tiempo (min)	28093.471	2	14046.735	420.461	<0.0001
Error	1269.502	38	33.408		
Total	29362.973	40			

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Apéndice 25. **Análisis estadístico y de regresión modelo polinomial grado tres**

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Agua evaporada (kg)	41	0.960	0.956	39.195	264.197	272.765

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	7.638	3.232		1.089	14.187	2.363	0.0235	
Tiempo (min)	0.258	0.708	-1.178	1.693	0.364	0.7181	2.132	90.129
Tiempo (min)^2	0.005	0.041	-0.079	0.089	0.115	0.9087	2.013	528.129
Tiempo (min)^3	0.001	0.001	-2.6E-04	0.003	1.647	0.1080	4.713	209.889

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28180.191	3	9393.397	293.846	<0.0001
Tiempo (min)	24761.095	1	24761.095	774.581	<0.0001
Tiempo (min)^2	3332.376	1	3332.376	104.244	<0.0001
Tiempo (min)^3	86.720	1	86.720	2.713	0.1080
Error	1182.782	37	31.967		
Total	29362.973	40			

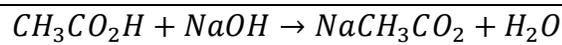
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28180.191	3	9393.397	293.846	<0.0001
Tiempo (min)	28180.191	3	9393.397	293.846	<0.0001
Error	1182.782	37	31.967		
Total	29362.973	40			

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de porcentaje de acidez titulable expresada como ácido acético solución NaOH 0.05N



$$\%Acidez = V_t(ml) * \frac{0.05 \text{ mol NaOH}}{1L NaOH} * \frac{1L NaOH}{1000ml NaOH} * \frac{1 \text{ mol Ácido acético.}}{1 \text{ mol NaOH}}$$
$$* \frac{60.05 \text{ qq Ácido acético}}{1 \text{ mol Ácido acético}} * \frac{1}{P_m(g)} * \frac{V_d(ml)}{V_m(ml)} * 100$$

$$\%Acidez = \frac{V_t * 0.0030025V_d}{P_m * V_m} * 100$$

Donde:

V_t = Volumen tituable de NaOH en mililitros

V_d = Volumen de disolución original en 100 mililitros

P_m = Peso muestra en gramos

V_m = Volumen de muestra titulado 10 mililitros

Fuente: Empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro
16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de
Frajanes, Guatemala.

Anexo 2. Prueba de consistencia de Bostwick

1. Verificar que el consistómetro este nivelado, sino ajustar tornillos hasta que el indicador se encuentre centrado.
2. Cerrar compuerta del consistómetro.
3. Mediante el uso de la espátula llenar completamente el comportamiento con la muestra.
4. Tomar con el cronometro 30 segundos a partir del momento en que se presione la palanca de seguridad y se abra la compuerta para dejar fluir la muestra en el área graduada del consistómetro.
5. Leer distancia recorrida por la muestra al finalizar el tiempo.
6. Limpiar con agua y jabón.

Fuente: Método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la ASTM. (2019). *ASTM F1080-93 Standard Test Method for Determining the Consistency of Viscous Liquids Using a Consistometer.*

Anexo 3. Prueba de viscosidad

1. Colocar muestra en un beacker de 100 ml llenando al ras para que la muestra cubra la marca de la aguja.
2. Verificar que las muestras estén a 21 °C para materias primas y entre 25 °C y 30 °C para producto terminado.
3. Seleccionar la aguja adecuada y las revoluciones de acuerdo con el tipo de producto.
4. Introducir aguja en la muestra tratando de que esta quede centrada y cubra la marca de la aguja.
5. Encender y con cronometro tomar 30 segundos.
6. Leer resultado en cP.

Fuente: Método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la ASTM. (2020). *ASTM D2196 Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer.*

Anexo 4. **Prueba de contenido de sólidos solubles en Brix**

1. Verificar que la temperatura de la muestra sea menor o igual a 90 °C.
2. Para materias primas hacer solución base.
3. Para la salsa, colocar muestra hasta cubrir el prisma.
4. Leer cantidad de Brix.
5. Limpiar con agua destilada.

Fuente: Método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la AOAC. (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL*, AOAC 970.59.

Anexo 5. **Prueba porcentaje de acidez titulable como ácido acético**

1. Pesar 1 g de muestra en beacker de 250 ml.
2. Disolver la muestra de salsa en 100 ml de agua destilada.
3. Mezclar solución con agitador magnético hasta obtener una solución homogénea.
4. Retirar el agitador con varilla.
5. Pipetear 10 ml de solución y colocarlo en beacker de 100 ml.
6. Añadir 4 gotas de fenolftaleína.
7. Titular con hidróxido de sodio 0.05 N y agitar hasta obtener viraje en donde se torne rosado.
8. Ver volumen utilizado y calcular el porcentaje de ácido.

Fuente: Método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la AOAC (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL, AOAC 942.15.*

Anexo 6. Prueba de pH

1. Calibrar el potenciómetro.
2. Encender potenciómetro.
3. Colocar la cantidad necesaria de la muestra en un beacker de 100 ml para que esta cubra el sensor del electrodo.
4. Introducir electrodo dentro del beacker con la muestra.
5. Tomar lectura proporcionada.
6. Limpiar electrodo del potenciómetro con agua desmineralizada

Fuente: Método de empresa procesadora de alimentos ubicada en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de Fraijanes, Guatemala, basado en la AOAC (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL, AOAC 981.12.*

Anexo 7. Valores críticos de la distribución t

Tabla A.4 Valores críticos de la distribución t

737

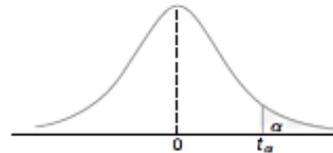


Tabla A.4 Valores críticos de la distribución t

v	α						
	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025
1	0.325	0.727	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706
2	0.289	0.617	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303
3	0.277	0.584	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182
4	0.271	0.569	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776
5	0.267	0.559	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571
6	0.265	0.553	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447
7	0.263	0.549	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365
8	0.262	0.546	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306
9	0.261	0.543	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262
10	0.260	0.542	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228
11	0.260	0.540	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201
12	0.259	0.539	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179
13	0.259	0.538	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160
14	0.258	0.537	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145
15	0.258	0.536	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131
16	0.258	0.535	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120
17	0.257	0.534	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110
18	0.257	0.534	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101
19	0.257	0.533	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093
20	0.257	0.533	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086
21	0.257	0.532	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080
22	0.256	0.532	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074
23	0.256	0.532	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069
24	0.256	0.531	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064
25	0.256	0.531	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060
26	0.256	0.531	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056
27	0.256	0.531	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052
28	0.256	0.530	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048
29	0.256	0.530	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045
30	0.256	0.530	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042
40	0.255	0.529	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021
60	0.254	0.527	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000
120	0.254	0.526	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980
∞	0.253	0.524	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960

Fuente: Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.

Anexo 8. Tabla valores críticos de F para $\alpha = 0.05$

Tabla A.6 Valores críticos de la distribución F

741

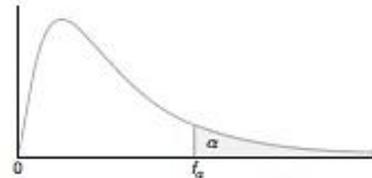


Tabla A.6 Valores críticos de la distribución F

v_2	$f_{dist}(v_1, v_2)$								
	v_1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

Reproducida de la tabla 18 de *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. I, con autorización de E.S. Pearson y Biometrika Trustees.

Fuente: Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.

Anexo 9. Continuación tabla valores críticos de F para $\alpha = 0.05$

742

Apéndice A Tablas y demostraciones estadísticas

Tabla A.6 (continuación) Valores críticos de la distribución F

v_2	$f_{0.05}(v_1, v_2)$									
	v_1									
	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	241.88	243.91	245.95	248.01	249.05	250.10	251.14	252.20	253.25	254.31
2	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Fuente: Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*.

Anexo 10. Puntos porcentuales del estadístico rango estudentizado 5 %

Tabla A5 Puntos porcentuales del estadístico rango estudentizado (5%).

$$q_{05}(p, f)$$

f	p															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	18.10	26.70	32.8	37.20	40.50	43.10	45.40	47.30	49.10	50.60	51.90	53.20	54.30	55.40	56.30	
2	6.09	8.28	9.80	10.89	11.73	12.43	13.03	13.54	13.99	14.39	14.75	15.08	15.38	15.65	15.90	
3	4.50	5.88	6.83	7.51	8.04	8.47	8.85	9.18	9.46	9.72	9.95	10.16	10.35	10.52	10.60	
4	3.93	5.00	5.76	6.31	6.73	7.06	7.35	7.60	7.83	8.03	8.21	8.37	8.52	8.67	8.80	
5	3.61	4.54	5.18	5.64	5.99	6.28	6.52	6.74	6.93	7.10	7.25	7.39	7.52	7.64	7.75	
6	3.46	4.34	4.90	5.31	5.63	5.89	6.12	6.32	6.49	6.65	6.79	6.92	7.04	7.14	7.24	
7	3.34	4.16	4.68	5.06	5.35	5.59	5.80	5.99	6.15	6.29	6.42	6.54	6.65	6.75	6.84	
8	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	6.05	6.18	6.29	6.39	6.48	6.57	
9	3.20	3.95	4.42	4.76	5.02	5.24	5.43	5.60	5.74	5.87	5.98	6.09	6.19	6.28	6.36	
10	3.15	3.88	4.33	4.66	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	5.72	5.83	5.93	6.03	6.12	6.20	
11	3.11	3.82	4.26	4.58	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	5.61	5.71	5.81	5.90	5.98	6.06	
12	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.40	5.51	5.61	5.71	5.80	5.88	5.95	
13	3.06	3.73	4.15	4.46	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	5.43	5.53	5.63	5.71	5.79	5.86	
14	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	5.36	5.46	5.56	5.64	5.72	5.79	
15	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	5.31	5.40	5.49	5.57	5.65	5.72	
16	3.00	3.65	4.05	4.34	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	5.26	5.35	5.44	5.52	5.59	5.66	
17	2.98	3.62	4.02	4.31	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	5.21	5.31	5.39	5.47	5.55	5.61	
18	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.83	4.96	5.07	5.17	5.27	5.35	5.43	5.50	5.57	
19	2.96	3.59	3.98	4.26	4.47	4.64	4.79	4.92	5.04	5.14	5.23	5.32	5.39	5.46	5.53	
20	2.95	3.58	3.96	4.24	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	5.11	5.20	5.28	5.36	5.43	5.50	
24	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	5.01	5.10	5.18	5.25	5.32	5.38	
30	2.89	3.48	3.84	4.11	4.30	4.46	4.60	4.72	4.83	4.92	5.00	5.08	5.15	5.21	5.27	
40	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.74	4.82	4.90	4.98	5.05	5.11	5.17	
60	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	4.73	4.81	4.88	4.94	5.00	5.06	
120	2.80	3.36	3.69	3.92	4.10	4.24	4.36	4.47	4.56	4.64	4.71	4.78	4.84	4.90	4.95	
∞	2.77	3.32	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	4.55	4.62	4.68	4.74	4.80	4.84	

Fuente: Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2008).

Análisis y diseño de experimentos.