



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

**SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÚN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A  
PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE  
ESTABILIDAD ACELERADA**

**Javier Eduardo Ayala Angeles**

Asesorado por la Inga. Dinna Lissette Estrada Moreira  
y por el Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

Guatemala, febrero de 2021





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÚN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A  
PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE  
ESTABILIDAD ACELERADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JAVIER EDUARDO AYALA ANGELES**

ASESORADO POR LA INGA. DINNA LISSETTE ESTRADA MOREIRA  
Y POR EL ING. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2021



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. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADORA	Inga. Adela María Marroquín González
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:

### **SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÚN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ACELERADA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 30 de julio de 2018.

**Javier Eduardo Ayala Angeles**



Guatemala 29 de julio de 2020

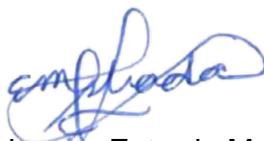
Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

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: **“SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÚN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ACELERADA”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química Javier Eduardo Ayala Angeles, quien se identifica con el registro académico 2014-08423 y con el CUI 2803 36071 0101.

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

Atentamente,



Dinna Lissette Estrada Moreira  
ASESORA  
Ingeniera Química  
Colegiado activo no. 666



Guatemala 29 de julio de 2020

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

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: **“SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÚN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ACELERADA”**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química Javier Eduardo Ayala Angeles, quien se identifica con el registro académico 2014-08423 y con el CUI 2803 36071 0101.

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

Atentamente.



**INGENIERO QUÍMICO  
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ  
COL. 1734**

William Eduardo Fagiani Cruz  
ASESOR  
Ingeniero Químico  
Colegiado activo no. 1734





Guatemala, 15 de octubre de 2020.  
Ref. EIQ.TG-IF.037.2020.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **058-2018**, 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: **Javier Eduardo Ayala Angeles**.  
Identificado con número de carné: **2803360710101**.  
Identificado con registro académico: **201408423**.  
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:

**SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÚN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ACELERADA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

**Dinna Lisette Estrada Moreira, profesional de la Ingeniería Química**  
**William Eduardo Fagiani Cruz, 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”



**Julio David Vargas García**  
Ingeniero Químico  
Cof.1688

Julio David Vargas García  
profesional de la Ingeniería Química  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo





Guatemala, 11 de febrero de 2021.  
Ref. EIQ.013.2021

### Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera  
Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÓN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ACELERADA** del(la) estudiante Javier Eduardo Ayala Angeles, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

*“Id y Enseñad a Todos”*


Ing. Williams G. Alvarez Mejia M.U.I.E.  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

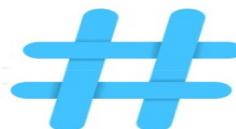
Cc. Archivo  
WGAM/mpeca



Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



NO SALGAS  
QUÉDATE EN  
CASA



DTG. 041.2021.

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: **SELECCIÓN DEL EMULGENTE PARA UN BETÓN LÍQUIDO DE ZAPATOS EN EMULSIÓN A PARTIR DE UN MODELO CINÉTICO OBTENIDO MEDIANTE UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD ACELERADA**, presentado por el estudiante universitario: **Javier Eduardo Ayala Angeles**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, febrero de 2021.

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mi madre**

Karina Angeles, por su amor, su cariño, su apoyo, por esas palabras de aliento y por motivarme a siempre ser mi mejor versión.

### **Mi padre**

Eduardo Ayala, por su cariño, su paciencia en los días duros y por siempre echarme una mano cuando más lo necesitaba.

### **Mi abuela**

Dora Ayala, por ser una parte muy importante en mi vida, por nunca dudar de mi esfuerzo y por apoyarme siempre.

### **Mi madrina**

Lidia Cadenas, por su cariño, por escucharme, por tus consejos y por creer en mí y en mis habilidades.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Mis padres y familia** Por brindarme su apoyo a lo largo de mi carrera profesional y motivarme para lograr alcanzar todas mis metas.
- Mis amigos del alma** Andrea Guzmán, José Soto, Luis Amado, Camilo Cardona, Alejandro Santamarina, Andrés Aguilar y Adrián Cifuentes, por ser como hermanos para mí, por apoyarme en los días duros y por celebrar conmigo mis victorias.
- Mis amigos químicos** Por haber coincidido en estos años de preparación académica, muy agradecido con ustedes por hacer este camino más fácil y divertido, en especial a Michelle Sagastume, Melannie Chávez, Juan Reyes, Gerardo Baldizón, Jimena Ramírez y André González.
- Sandra Pineda** Por tu gran amistad y cariño, por nuestro mutuo apoyo en todo y por el respectivo café con donas en los días de estudio previos al examen privado.
- Mis asesores** Inga. Dinna e Ing. Fagiani, por haberme asesorado en la realización del presente trabajo,

por sus consejos, apoyo, dedicación y por la  
paciencia.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Fase oleosa (O).....	5
2.2. Fase acuosa (W) .....	5
2.3. Emulsiones .....	5
2.3.1. Emulgente.....	7
2.3.2. Regla de Bancroft .....	10
2.3.2.1. Escala HLB.....	11
2.4. Mecanismos de ruptura de emulsiones .....	12
2.4.1. Cremado .....	12
2.4.2. Floculación.....	12
2.4.3. Coalescencia .....	13
2.4.4. Rotura .....	13
2.5. Preformulación .....	14
2.6. Estudio de estabilidad acelerada.....	15
2.6.1. Análisis cinético de proceso.....	17

3.	METODOLOGÍA .....	19
3.1.	Variables .....	19
3.2.	Delimitación de campo de estudio .....	19
3.2.1.	Área de conocimiento.....	19
3.2.2.	Proceso .....	20
3.2.3.	Ubicación.....	20
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	20
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	20
3.4.1.	Materiales y suministros.....	20
3.4.2.	Mobiliario y equipo .....	21
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	22
3.5.1.	Preformulación de emulsiones .....	22
3.5.2.	Preparación de emulsiones y formulación final .....	23
3.5.3.	Estudio de estabilidad acelerada.....	24
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	24
3.6.1.	Datos originales.....	25
3.7.	Análisis estadístico.....	28
3.7.1.	Análisis de correlación $R^2$ .....	28
3.7.2.	Análisis de varianza .....	28
3.7.3.	Distribución F .....	30
3.7.4.	Análisis de residuos .....	31
3.7.5.	Estimación del tiempo de vida de las emulsiones ...	32
3.8.	Plan de análisis de los resultados .....	32
3.8.1.	Programas por utilizar para análisis de datos.....	32
4.	RESULTADOS.....	33
4.1.	Construcción del modelo matemático para el comportamiento de la viscosidad cinemática en el betún líquido para predecir el tiempo de vida de anaquel .....	36

4.1.1.	Emulsiones de betún en incubación a 10 °C de temperatura .....	37
4.1.2.	Emulsiones de betún líquido en incubación a 25 °C de temperatura .....	47
4.1.3.	Emulsiones de betún líquido en incubación a 40 °C de temperatura .....	55
4.2.	Predicción del tiempo de vida de las diferentes formulaciones de betún líquido a un año .....	65
4.2.1.	Formulaciones a 10 °C de temperatura .....	65
4.2.2.	Formulaciones a 25 °C de temperatura .....	67
4.2.3.	Formulaciones a 40 °C de temperatura .....	68
4.3.	Proyección de tiempo de vida.....	70
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	73
5.1.	Caracterización de la viscosidad cinemática a 10 °C .....	73
5.2.	Caracterización de la viscosidad cinemática a 25 °C .....	74
5.3.	Caracterización de la viscosidad cinemática a 40 °C .....	75
5.4.	Comportamiento cualitativo de las diferentes formulaciones de betún líquido durante y al final del período de incubación ..	77
	CONCLUSIONES .....	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICES .....	91



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Emulsiones O/W y W/O .....	6
2.	Emulsiones múltiples .....	7
3.	Emulgentes .....	8
4.	Estructura molecular del Tween 20 y Tween 80 .....	9
5.	Estructura molecular del lauril sulfato de sodio.....	10
6.	Escala HLB .....	11
7.	Mecanismos de ruptura de emulsiones .....	13
8.	Gráfico de viscosidad en función del tiempo.....	17
9.	Descripción del análisis experimental .....	30
10.	Gráfica de distribución F .....	31
11.	Viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en función del tiempo a 25 °C de temperatura de incubación .....	33
12.	Viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en función del tiempo a 10 °C de temperatura de incubación .....	34
13.	Viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en función del tiempo a 40 °C de temperatura de incubación .....	35
14.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 1 a 10 °C .....	38
15.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 2 a 10 °C .....	39
16.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 2 a 10 °C.....	39
17.	Gráfica de residuos para la formulación 2 a 10 °C.....	40

18.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 3 a 10 °C .....	41
19.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 4 a 10 °C .....	42
20.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 4 a 10 °C .....	42
21.	Gráfica de residuos para la formulación 4 a 10°C .....	43
22.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 5 a 10 °C .....	44
23.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 5 a 10 °C .....	44
24.	Gráfica de residuos para la formulación 5 a 10 °C .....	45
25.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 6 a 10 °C .....	46
26.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 6 a 10 °C .....	46
27.	Gráfica de residuos para la formulación 6 a 10 °C .....	47
28.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 1 a 25 °C .....	48
29.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 2 a 25 °C .....	49
30.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 2 a 25 °C .....	50
31.	Gráfica de residuos para la formulación 2 a 25 °C .....	50
32.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 3 a 25 °C .....	51
33.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 4 a 25 °C .....	52
34.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 5 a 25 °C .....	53
35.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 6 a 25 °C .....	54
36.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 6 a 25 °C .....	54

37.	Gráfica de residuos para la formulación 6 a 25 °C.....	55
38.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 1 a 40 °C .....	56
39.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 2 a 40 °C .....	57
40.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 2 a 40 °C.....	58
41.	Gráfica de residuos para la formulación 2 a 40 °C.....	58
42.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 3 a 40 °C .....	59
43.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 4 a 40 °C .....	60
44.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 4 a 40 °C.....	60
45.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 4 a 40 °C.....	61
46.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 5 a 40 °C .....	62
47.	Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 6 a 40 °C .....	63
48.	Gráfica de probabilidad normal para la formulación 6 a 40 °C.....	63
49.	Gráfica de residuos para la formulación 6 a 40 °C.....	64
50.	Gráfico de tendencia de la viscosidad cinemática para la formulación 6 a 25 °C .....	71
51.	Calzado antes y después de la aplicación de la formulación 6 .....	79

## TABLAS

I.	Sustancias preseleccionadas para emulsión de betún líquido (parte1).....	14
II.	Sustancias preseleccionadas para emulsión de betún líquido (parte 2).....	15

III.	Definición operacional de las variables cuantificables .....	19
IV.	Lista de reactivos utilizados .....	21
V.	Nombre del equipo, accesorios y cristalería por utilizar .....	21
VI.	Preformulación de emulsiones.....	22
VII.	Fórmula final del betún líquido .....	25
VIII.	Formulación de betún líquido con Tween 80 al 16 % .....	25
IX.	Formulación de betún líquido con Tween 80 al 12 % .....	26
X.	Formulación de betún líquido con Tween 80 al 8 % .....	26
XI.	Formulación de betún líquido con Tween 20 al 16 % .....	27
XII.	Formulación de betún líquido con Tween 20 al 12 % .....	27
XIII.	Formulación de betún líquido con Tween 20 al 8 % .....	28
XIV.	Regresiones analizadas para las formulaciones de betún líquido .....	36
XV.	Resumen de modelos aceptados y sus criterios para cada formulación de betún líquido a 10 °C .....	37
XVI.	Modelo matemático para la formulación 1 a 10 °C .....	38
XVII.	Modelo matemático para la formulación 2 a 10°C .....	40
XVIII.	Modelo matemático para la formulación 3 a 10 °C .....	41
XIX.	Modelo matemático para la formulación 4 a 10 °C .....	43
XX.	Modelo matemático para la formulación 5 a 10 °C .....	45
XXI.	Modelo matemático para la formulación 6 a 10 °C .....	47
XXII.	Resumen de modelos aceptados y sus criterios para cada formulación de betún líquido a 25 °C .....	48
XXIII.	Modelo matemático para la formulación 1 a 25 °C .....	49
XXIV.	Modelo matemático para la formulación 2 a 25 °C .....	51
XXV.	Modelo matemático para la formulación 3 a 25 °C .....	51
XXVI.	Modelo matemático para la formulación 4 a 25 °C .....	52
XXVII.	Modelo matemático para la formulación 5 a 25°C .....	53
XXVIII.	Modelo matemático para la formulación 6 a 25 °C .....	55

XXIX.	Resumen de modelos aceptados y sus criterios para cada formulación de betún líquido a 40 °C .....	56
XXX.	Modelo matemático para la formulación 1 a 40 °C.....	57
XXXI.	Modelo matemático para la formulación 2 a 40 °C.....	59
XXXII.	Modelo matemático para la formulación 3 a 40 °C.....	59
XXXIII.	Modelo matemático para la formulación 4 a 40 °C.....	61
XXXIV.	Modelo matemático para la formulación 5 a 40 °C.....	62
XXXV.	Modelo matemático para la formulación 6 a 40 °C.....	64
XXXVI.	Predicción de la viscosidad cinemática a un año para las formulaciones de betún líquido a 10 °C .....	65
XXXVII.	Comparación de viscosidades cinemáticas para las formulaciones de betún líquido a 10 °C.....	66
XXXVIII.	Predicción de la viscosidad cinemática a un año para las formulaciones de betún líquido a 25 °C .....	67
XXXIX.	Comparación de viscosidades cinemáticas para las formulaciones de betún líquido a 25 °C.....	68
XL.	Predicción de la viscosidad cinemática a un año para las formulaciones de betún líquido a 40 °C .....	69
XLI.	Comparación de viscosidades cinemáticas para las formulaciones de betún líquido a 40 °C.....	70



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$R^2$	Coefficiente de determinación
<b>C</b>	Concentración
$\rho$	Densidad
$\sigma$	Desviación estándar
$E$	Energía de activación
$\ln$	Logaritmo natural
$\bar{x}$	Media aritmética
$pH$	Potencial de hidrógeno
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
$T$	Temperatura
$t$	Tiempo
$p$	Valor P de la prueba de Anderson Darling
$\nu$	Viscosidad cinemática
$\mu$	Viscosidad dinámica



## GLOSARIO

<b>Acuoso</b>	Compuesto principalmente de agua.
<b>Alícuota</b>	Parte que se toma de un volumen cuyas propiedades físicas y químicas, y su composición, representan la sustancia original.
<b>Anaquelel</b>	Tabla horizontal pegada a la pared que sirve para colocar objetos en ella.
<b>Anión</b>	Ion que ha ganado electrones, por tanto, tiene carga negativa.
<b>Apolar</b>	Moléculas generadas por la unión de dos moléculas que poseen misma electronegatividad.
<b>Asfalteno</b>	Familia de químicos orgánicos provenientes del petróleo crudo.
<b>Betún</b>	Producto hecho a base de ceras y tintes que sirve para dar lustre a la piel del calzado.
<b>Bituminoso</b>	Que contiene betún.
<b>Capilar</b>	Que contiene un grosor determinar para la acción de las fuerzas de cohesión y adhesión de líquidos.

<b>Catión</b>	Ion que ha perdido electrones, por tanto, tiene carga positiva.
<b>Cinética</b>	Parte de la física que estudia los sistemas estáticos o en movimiento mediante el empleo de conceptos de longitud, tiempo y masa.
<b>Coalescer</b>	Unión de las partículas en suspensión coloidal o en emulsión para formar granos o gotas mayores.
<b>Coloide</b>	Dispersión de partículas sólidas de tamaño pequeño en un líquido o un gas.
<b>Continuo</b>	Que no muestra interferencias, se repite con frecuencia.
<b>Cuantificar</b>	Expresar de forma numérica las magnitudes.
<b>Difusión</b>	Movimiento de las moléculas de una sustancia de un medio de menor concentración a uno con mayor concentración, sin generación adicional de energía.
<b>Disolvente</b>	Sustancia o líquido capaz de mezclar y homogenizar otra sustancia.
<b>Disperso</b>	Constituidos que están separados entre sí, resultado de una dispersión.

<b>Emulgente</b>	Sustancia que ayuda a que dos sustancias inmiscibles puedan ser mezcladas.
<b>Emulsión</b>	Líquido de aspecto lácteo que contiene en suspensión pequeñas partículas o gotas de otra sustancia insolubles en él mismo.
<b>Emulsionante</b>	Sinónimo de emulgente.
<b>Excipiente</b>	Sustancias que se mezclan en diferentes formulaciones para dar consistencia o ciertas características específicas.
<b>Flóculo</b>	Grupo de materia orgánica aglomerada por acción de la agregación de sólidos en suspensión.
<b>Hidrocarburo</b>	Compuesto químico formado por hidrógeno y carbono.
<b>Hidrófilo</b>	Que absorbe agua con facilidad.
<b>Hidrofóbico</b>	Que repele el agua.
<b>Inmiscible</b>	Que no puede ser mezclado.
<b>Ion</b>	Partícula cargada eléctricamente por causa de una ganancia o pérdida de electrones en átomos o moléculas.

<b>Lípido</b>	Grasa, sustancia orgánica insoluble en agua, constituida por ácidos grasos y ésteres.
<b>Lipófilo</b>	Que tiene tendencia a combinarse con los lípidos.
<b>Lipofóbico</b>	Que repele los lípidos.
<b>Microscópico</b>	Algo muy pequeño que solo puede ser visto a partir de un microscopio.
<b>Micela</b>	Conjunto de moléculas que constituye una de las fases de los coloides.
<b>Miscible</b>	Que puede mezclarse en cualquier proporción. Pertenece a la solubilidad.
<b>Molécula</b>	Agrupación definida y ordenada de átomos que constituye una proporción más pequeña de una sustancia pura y conserva todas sus propiedades.
<b>Oleosa</b>	Que contiene o tiene la textura del aceite.
<b>Pirólisis</b>	Descomposición química de materia de carácter irreversible, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.
<b>Polar</b>	Propiedad de las moléculas que representa la separación de las cargas eléctricas en la misma molécula.

<b>Principio activo</b>	Principal sustancia o sustancias que ejercen una acción farmacológica, metabólica o principal para corregir, restaurar o eliminar una función fisiológica o física.
<b>Resina</b>	Sustancia orgánica pastosa, pegajosa, transparente, que se solidifica en contacto con el aire; de origen vegetal o por reacciones de polimerización.
<b>Solubilidad</b>	Capacidad de una sustancia para disolverse al mezclarse con un líquido.
<b>Soluto</b>	Sustancia que está disuelta en otra.
<b>Tensoactivos</b>	Sustancia que influye por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases. Sinónimo de emulgente.
<b>Tubería</b>	Conducto formado por tubos para distribuir fluidos.
<b>Viscosidad</b>	Resistencia de los fluidos a fluir en movimiento.



## RESUMEN

En este trabajo de investigación se seleccionó al agente emulgente más adecuado para una nueva formulación de betún líquido para zapatos a partir de un estudio de estabilidad acelerada.

Para seleccionar al emulgente adecuado se estableció una formulación de betún líquido usando el *Handbook of pharmaceutical excipients* (la descripción de componentes y cantidades se encuentran detallada en la sección de metodología). Posteriormente se prepararon las emulsiones utilizando como emulgentes al Tween 80, Tween 20 y lauril sulfato de sodio a concentraciones de 8 %, 12 % y 16 % para un total de nueve formulaciones. Luego de dicha preparación se llevó a cabo un estudio de estabilidad acelerada en intervalos de tiempo de muestreo de 30, 60 y 90 días.

Durante este tiempo las formulaciones fueron expuestas a temperaturas de 10, 25 y 40 °C con el fin de acelerar la degradación de las emulsiones. Al finalizar el primer mes de incubación se observó que las formulaciones 7, 8 y 9 correspondientes al lauril sulfato de sodio como emulgente, presentaron rotura total de la emulsión, por lo tanto, este se descartó como un emulgente funcional para esta formulación de betún. El resto de las formulaciones no presentó cambios visibles, por lo que se siguieron analizando en el período de incubación establecido.

Finalmente, con el estudio de estabilidad acelerada se obtuvo el comportamiento de la viscosidad cinemática en función del tiempo para cada formulación. Con esta tendencia se realizaron diferentes regresiones

obteniendo modelos matemáticos con los cuales se pudo predecir la viscosidad cinemática a doce meses, siendo el Tween 20 al 8 % el emulgente en la formulación seis el escogido para el producto final, demostrando ser la emulsión más estable.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Inferir cuál es el emulgente más adecuado, entre los tres más usados, para una formulación de betún líquido de zapatos a base de emulsión, a partir de un estudio de estabilidad acelerada.

### **Específicos**

1. Construir un modelo matemático que describa el comportamiento de la viscosidad cinemática en función del tiempo para las distintas formulaciones de betún líquido y prediga su cambio en un año.
2. Estimar el tiempo de vida de anaquel de la emulsión de betún líquido para el emulgente seleccionado.



## INTRODUCCIÓN

Los altos estándares de calidad en los productos son importantes para lograr sobresalir en un mercado que cada día se vuelve más competitivo. En el caso de un producto a base de emulsión como el betún líquido para zapatos, este estándar de calidad se logra con un producto que de brillo y proteja el cuero de los zapatos, formulando una emulsión estable y que garantice al menos un año de vida útil previo a su degradación.

Para plantear el producto se deben seleccionar esas materias primas que den brillo, como es el caso de las ceras o parafinas, conocidas por sus propiedades pulidoras de superficie. A su vez los aceites, como el de ricino, que da brillo y protege las superficies de cuero humectando la piel y evitando que esta se endurezca con el tiempo. Ambas materias primas mencionadas son de carácter lipofílico, es decir, que tienen características parecidas a las del aceite.

Por otra parte, la glicerina fue seleccionada por sus propiedades humectantes y protectoras, y el agua como el solvente de todos los productos mencionados anteriormente para formar un producto líquido de fácil aplicación al calzado. Sin embargo, se presenta un problema, el solvente por utilizar y la glicerina en cuestión, tienen características hidrofílicas, es decir que son similares al agua en ciertas propiedades.

Una emulsión es una mezcla de dos líquidos o fases líquidas que son inmiscibles entre sí (agua y aceite). Para lograr la mezcla de ambas fases y formar la emulsión, se requiere de un componente que sea miscible con ambas y que logre mantenerlas juntas por cierto período de tiempo. El emulgente es el

encargado de cumplir tal función y su selección es de vital importancia para garantizar una emulsión estable por un tiempo prolongado.

Para garantizar la estabilidad de la emulsión y la compatibilidad de uno de los emulgentes con la formulación de la emulsión, se realiza un estudio de estabilidad acelerada donde se busca emular en un período de tres meses la degradación que la emulsión tendrá en condiciones normales por un año. Para lograrlo se deben mantener las emulsiones en incubación durante los tres meses siguientes, expuestas a temperaturas de 40, 25 y 10 °C. Durante este tiempo se monitorea visual y cuantitativamente el estado de las emulsiones, tomando muestras al final de cada mes.

Con los resultados del estudio de estabilidad acelerada se puede seleccionar a un emulgente de los estudiados para el producto final, y se podrá predecir el tiempo de vida que tendrá la emulsión en su disposición a los usuarios en condiciones ambientales, asegurando de esta manera la calidad del producto.

A continuación, se presenta en el primer capítulo los antecedentes de trabajos de investigación que sirvieron de inspiración y de base para la formulación de emulsiones y su estudio de estabilidad. En el segundo capítulo se encuentra el fundamento teórico en el cual se basa esta investigación.

En el tercer capítulo se describe la metodología utilizada para llevar a cabo la elaboración de las emulsiones de betún líquido. En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos durante la experimentación a partir de gráficos y tablas. En el quinto capítulo se encuentra la interpretación de estos gráficos y tablas donde se describe el porqué de la elección del Tween 20 como el emulgente ideal para esta formulación de betún líquido.

Por último, en los capítulos seis y siete se encuentran las conclusiones del trabajo y recomendaciones para una posible continuidad y mejora al presente trabajo de investigación, respectivamente.



## 1. ANTECEDENTES

Los estudios de estabilidad son usados frecuentemente en la formulación de nuevos productos de limpieza, cosméticos y farmacéuticos con el objetivo de predecir su tiempo de vida.

En la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala se llevó a cabo el trabajo de investigación titulado *Estudio de estabilidad acelerada en lotes piloto de un gel exfoliante elaborado a base de cáscara de huevo por medio de la cuantificación de calcio disuelto*. El informe define la vida útil para el gel exfoliante a base de cáscara de huevo mediante un estudio de estabilidad acelerada. Este informe fue de utilidad para definir la metodología del estudio de estabilidad acelerada aplicada al betún líquido de zapatos a base de emulsión.

La revista *Tecnología Química de la Universidad de Oriente de Cuba* publicó un artículo: Estabilidad de emulsiones acuosas de petróleo crudo pesado con agente emulsionante de productos de pirólisis. El artículo trata sobre los emulgentes estabilizadores de las emulsiones acuosas del petróleo crudo, su transporte por tuberías y los métodos que utilizan para realizar dichas mediciones basándose principalmente en la viscosidad. Esta investigación fue de utilidad para conocer emulgentes compatibles con el betún líquido y que no genere una emulsión con alta viscosidad que no sea útil para los propósitos del producto.

En el Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada se llevó a cabo la investigación para tesis doctoral

que lleva por título *Preparación, caracterización y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W*. El trabajo de investigación ayuda al investigador en conocer las propiedades necesarias que hacen a una emulsión estable con sus fases. A su vez, informa al investigador sobre la preparación de emulsiones de diferentes pesos moleculares.

En la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala se llevó a cabo el trabajo de investigación titulado *Análisis comparativo de estabilidad acelerada y estabilidad a largo plazo de jarabe de ambroxol en dos diferentes concentraciones, adultos y niños*. En la investigación realizan una comparación entre la efectividad del método de estabilidad acelerada frente a un método de estabilidad a largo plazo, para un fármaco. Este antecedente ayudó a comprobar que el estudio de estabilidad acelerada es confiable para el desarrollo de un producto.

En la revista *Carreteras* perteneciente a la Asociación técnica de emulsiones bituminosas se publicó la edición número 139 titulada *Las emulsiones de betún su química – física*. En la revista se describen las características químicas y físicas de emulsiones bituminosas y cómo formularlas. Explica que en la formulación de emulsiones se pueden escoger tres tipos de emulgentes; aniónicos, catiónicos y no iónicos, y los cálculos pertinentes para saber la tensión interfacial entre fases y las fuerzas de repulsión y atracción que existe entre las fases dispersa y continua con los emulgentes. El artículo sirvió para profundizar en el tema de emulsiones y los diversos emulgentes para emulsiones del betún.

En la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador se presentó el trabajo de graduación titulado *Determinación del balance hidrófilo-lipófilo (HLB) requerido de grasas y aceites de origen vegetal y animal*,

*para su utilización en las formulaciones farmacéuticas y cosméticas.* Dicho trabajo de graduación sirvió para comprender los cálculos del sistema HLB a partir de las concentraciones presentes de todos los reactivos que constituyen la emulsión. En el trabajo se menciona que una emulsión con HLB menor a 9 se considera de naturaleza lipofílica, por tanto, se debe seleccionar un emulgente que forme emulsiones del tipo W/O, mientras que un HLB mayor a 11 se considera de naturaleza hidrofílica, por tanto, el emulgente que debe seleccionarse es aquel que forme emulsiones del tipo O/W.

El *Journal of Colloids and Surfaces* publicó su edición número 174 titulada *Thin liquid film technique-application to water-oil-water bitumen emulsion films*. La investigación realizada tenía por objetivo obtener ideas acerca de la estabilidad de las resinas y asfaltenos a emulsiones bituminosas haciendo énfasis en las películas delgadas que se forman alrededor de las gotas de agua por efecto de un emulgente. Para el estudio utilizaron la técnica TLF-PBT (*thin liquid film-pressure balance technique*) que consiste en recrear una capa fina microscópica dentro de una celda de medición especial. El principio se basa en el balance de la presión capilar por el impuesto por la presión de rotura. El informe sirvió para comprender que se forman finas capas de emulgentes alrededor de las gotas de agua en las emulsiones bituminosas y que para ello debe tomarse en cuenta el tamaño de la gota.

El *Journal of Colloid and Interface Science* publicó su edición número 157 con un artículo titulado *Factors controlling the stability of colloid-stabilized emulsions*. El artículo trata acerca de los factores que afectan la estabilidad de las emulsiones cuando se utilizan emulgentes del tipo coloidal. Las partículas coloidales son efectivas para estabilizar las emulsiones cuando se ponen en contacto con las fases acuosa y oleosa. El trabajo resalta que las partículas del emulgente deben ser más pequeñas que las gotas de la fase dispersa para

garantizar la estabilidad de la emulsión, aplicable a las pruebas de la presente investigación.

El diario de Unilever realizado por su laboratorio de investigación en Inglaterra, publicó su informe de investigación titulado *Factors affecting emulsion stability, and the HLB concept*. El diario describe el estudio de las emulsiones a partir de la influencia del HLB y examina los factores que influyen en la estabilidad de la emulsión. Los investigadores utilizaron los emulgentes Span y Tween que son ésteres de ácidos grasos de sorbitán y etoxilados del sorbitán, respectivamente, y realizaron los estudios de estabilidad a temperaturas de 5, 25 y 40 °C para las emulsiones tipo O/W y a 25 °C para las emulsiones tipo W/O.

Analizaron el tamaño de partícula con una centrífuga fotosedimentadora y analizaron el comportamiento del número de gotas en función del número HLB de la emulsión y de la temperatura expuesta. El trabajo sirvió de referencia para considerar la escala HLB, la temperatura y la cantidad de gotas de fase dispersa como los factores principales que afectan la estabilidad de la emulsión previa a su coalescencia.

## 2. MARCO TEÓRICO

Para entender el funcionamiento de las emulsiones, se debe saber que se constituyen por dos fases que se describen a continuación.

### 2.1. Fase oleosa (O)

La fase oleosa regularmente está constituida por un producto químico orgánico de síntesis, como lo puede ser una gama de hidrocarburos, grasas y aceites procedentes de materias primas apenas manipuladas. No obstante, también se utilizan fases oleosas basadas en lípidos naturales modificados químicamente, por ejemplo, grasas hidrogenadas. Esta fase es de naturaleza apolar y los materiales de este tipo son llamados del tipo lipófilos.<sup>1</sup>

### 2.2. Fase acuosa (W)

En la fase acuosa de las emulsiones se encuentran moléculas de naturaleza hidrofílica y rara vez se encuentra una fase acuosa que consista en agua pura para una emulsión. Entre los componentes solubles en medio acuoso se encuentran las sales orgánicas e inorgánicas, ácidos, bases, azúcares, tensoactivos, proteínas, estabilizantes (polisacáridos, polímeros), conservantes y algunos colorantes. Desde un punto de vista químico, es muy importante distinguir las interacciones de los solutos iónicos, dipolares e hidrofóbicos con las moléculas de agua, debido al aumento del volumen cuando se somete la fase acuosa a bajas temperaturas.<sup>2</sup>

### 2.3. Emulsiones

Las emulsiones son dispersiones de dos líquidos inmiscibles entre sí (uno oleoso y otro acuoso), que pueden ser polares o apolares y uno de ellos forma gotas de pequeño tamaño, aproximadamente 0,1 a 100 micras de tamaño.

---

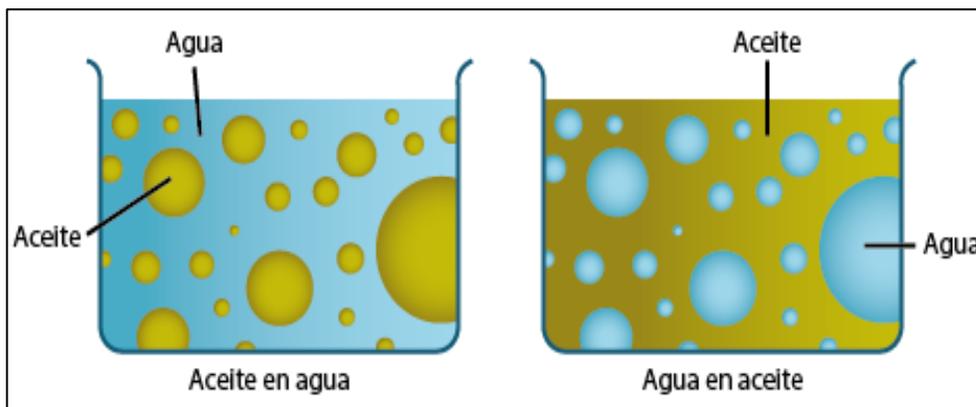
<sup>1</sup> MUÑOZ, José, ALFARO, María del Carmen, ZAPATA, Isabel. *Avances en la formulación de emulsiones*. p. 2.

<sup>2</sup> *Ibíd.*

“Este líquido que forma gotas es conocido como fase dispersa mientras que el otro, que se encuentra en mayor proporción, es conocido como fase continua”<sup>3</sup>. Existen dos tipos típicos de emulsiones que son:

- O/W: este tipo de emulsión es la dispersión de un líquido lipofílico en un líquido hidrofílico. La fase dispersa es la oleosa mientras que la continua es la acuosa.
- W/O: dispersión acuosa en un líquido de naturaleza lipofílica. La fase dispersa es la acuosa mientras que la continua es la oleosa.

Figura 1. Emulsiones O/W y W/O



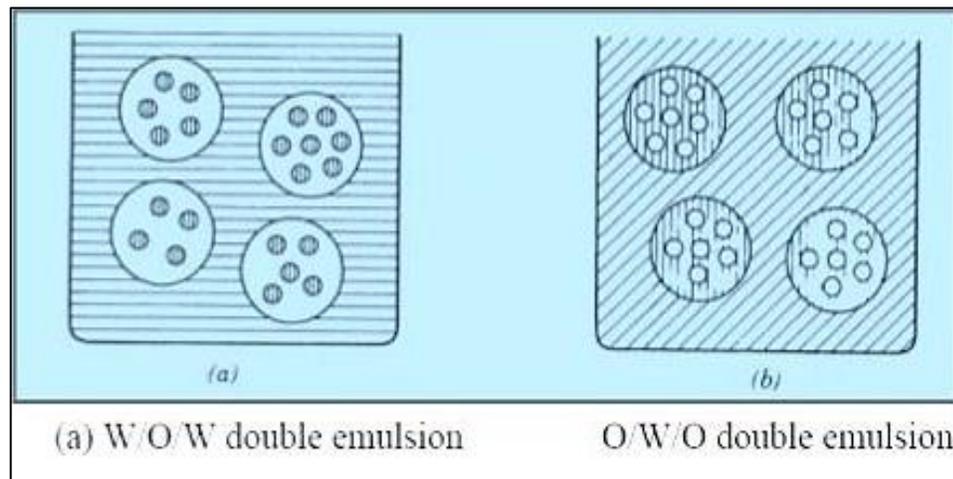
Fuente: Altus. *Aprender a hacer una emulsión*.

<http://altus.mx/metadatos/ALT~LABORATORIO/03/ALT~LABORATORIO~03~0003/introduccion.html>. Consulta: 30 de septiembre de 2018.

<sup>3</sup> MUÑOZ, José, ALFARO, María del Carmen, ZAPATA, Isabel. *Avances en la formulación de emulsiones*. p. 3.

También existen emulsiones múltiples que pueden ser O/W/O y W/O/W donde las gotas de la primera fase están dispersas en la segunda, y la segunda en la tercera de la siguiente manera:

Figura 2. **Emulsiones múltiples**



Fuente: Colegio Manipal de Profesiones de la Salud. *Multiple Emulsions*.

<https://www.slideshare.net/bharathpharmacist/multiple-emulsions>. Consulta: 30 de septiembre de 2018.

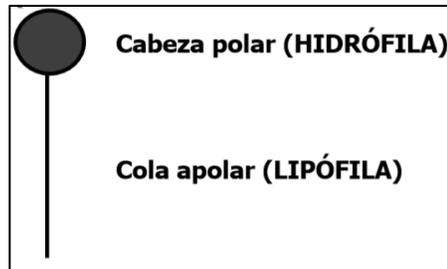
Para formar una emulsión, las fases dispersa y continua deben ser unidas mediante un agente emulgente, el cual tiene características hidrofílicas y lipofílicas de forma simultánea, y de esta manera mantener a las fases mezcladas y estables por un tiempo determinado.

### 2.3.1. **Emulgente**

El emulgente es un agente estabilizador que se utiliza para ligar a las fases dispersa y continua en emulsión por un período de tiempo prolongado. Los emulgentes son moléculas anfifílicas, es decir, con cabeza polar (hidrofílica) y cola apolar (lipofílica). La parte polar es miscible en agua y soluciones acuosas,

mientras que la parte apolar es miscible en soluciones oleosas. La estabilización de la emulsión se logra limitando la movilidad de las gotas de la fase dispersa, gracias al aumento de viscosidad de la fase continua.<sup>4</sup>

Figura 3. **Emulgentes**



Fuente: FERNANDEZ, Mercedes. *Emulsiones*. p. 21.

Para este estudio en particular, se analizarán como medios emulgentes al Tween 20, Tween 80 y al lauril sulfato de sodio, para la emulsión del betún líquido de zapatos. A continuación, se describe cada emulgente:

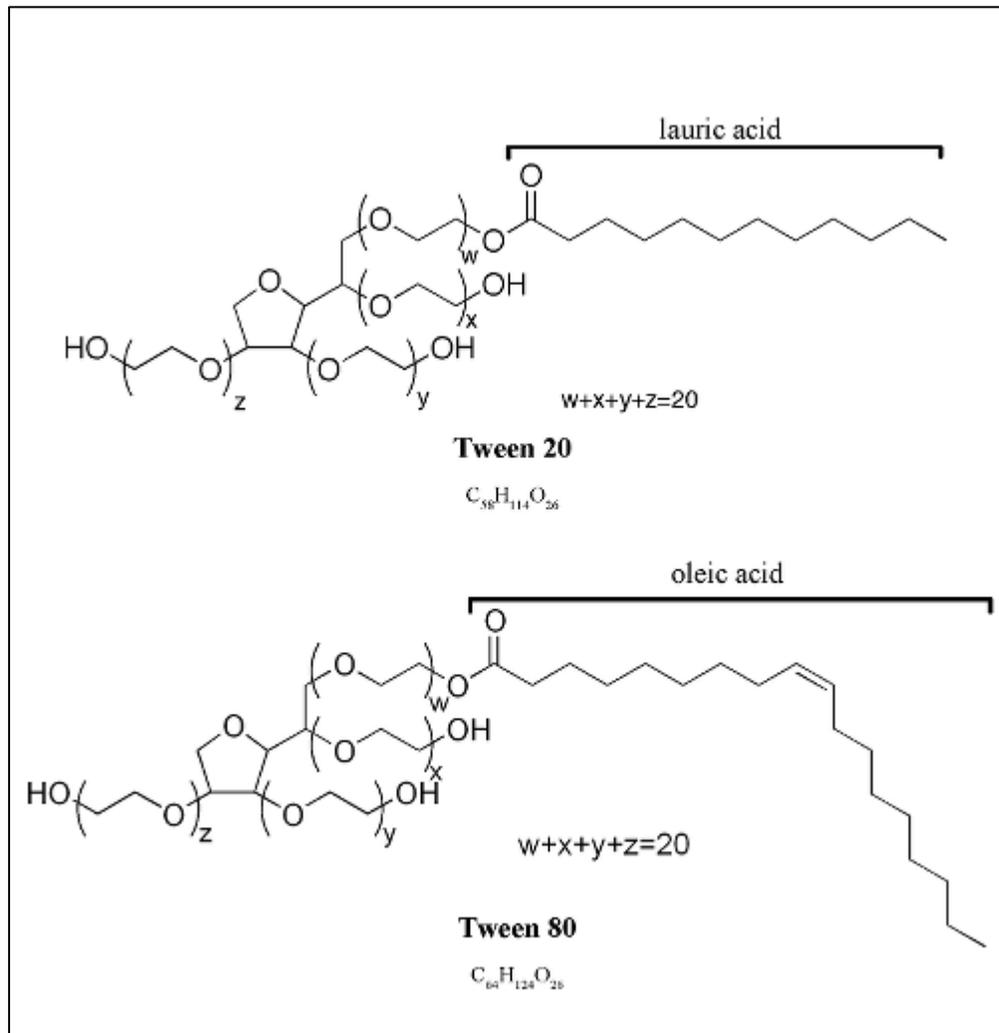
- Tween 20: el Tween 20 o polisorbato 20 es un éster del sorbitol parcialmente esterificado con ácidos grasos superiores. Es un agente emulgente con HLB de 16.7, ideal para emulsiones del tipo O/W. su apariencia es de un líquido viscoso amarillento que es soluble en agua, etanol anhidro, acetato de etilo y metanol. Su fórmula molecular es  $C_{58}H_{114}O_{26}$  (Acofarma).
- Tween 80: también polisorbato 80, es un derivado del sorbitol. Usado como agente emulgente, es un líquido oleoso usado en fabricación de emulsiones como jabones, cremas y detergentes. Posee un HLB de 15 y

---

<sup>4</sup> MUÑOZ, José, ALFARO, María del Carmen, ZAPATA, Isabel. *Avances en la formulación de emulsiones*. p. 4.

es soluble en agua, etanol anhidro, acetato de etilo y metanol. Su fórmula molecular es  $C_{64}H_{124}O_{26}$  (Acofarma).

Figura 4. Estructura molecular del Tween 20 y Tween 80



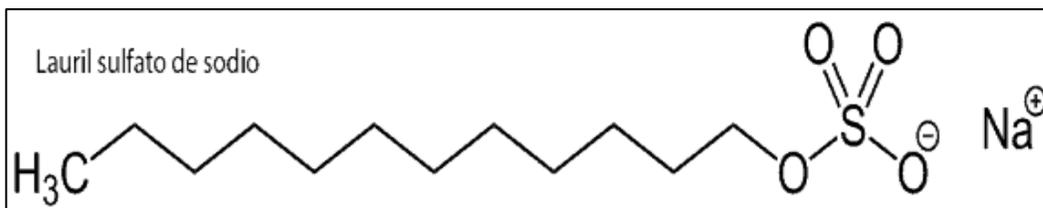
Fuente: MATER METHODS. *Detergentes: Triton X-100, Tween-20, y más.*

<http://www.labome.es/method/Detergents-Triton-X-100-Tween-20-and-More.html>. Consulta: 30 de septiembre de 2018.

- Lauril sulfato de sodio: es un emulgente muy económico y muy usado en la industria para la elaboración de emulsiones. Es desde un líquido amarillento hasta una pasta. Posee mecanismos detergentes y es conocido por ser buen generador de espuma. Es soluble en agua y parcialmente soluble en etanol.

Homogenizar su mezcla por simple agitación resulta complicado por lo cual es necesario el uso de un mezclador de grandes revoluciones para homogenizarlo en agua previo a la adición de más componentes en una formulación.

Figura 5. **Estructura molecular del lauril sulfato de sodio**



Fuente: Curiosoando.com. *¿Qué es un surfactante o tensioactivo aniónico?*

<https://curiosoando.com/surfactante-o-tensioactivo-anionico>. Consulta: 30 de septiembre de 2018.

### 2.3.2. Regla de Bancroft

Wilder Dwight Bancroft planteó en 1913 que la estructura de una emulsión depende de la naturaleza de su emulgente. La regla de Bancroft define que la estabilidad de las emulsiones está estrechamente relacionada con la elección del emulgente a partir de la solubilidad que este presente con las fases. En resumen, Bancroft asegura que la solubilidad del medio emulgente con una fase en particular es lo que constituye a esa fase como la continua sin importar la proporción en la que se encuentren las fases oleosa y acuosa.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> FERNÁNDEZ, Alejandro. *Preparación, caracterización y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W*. p. 125.

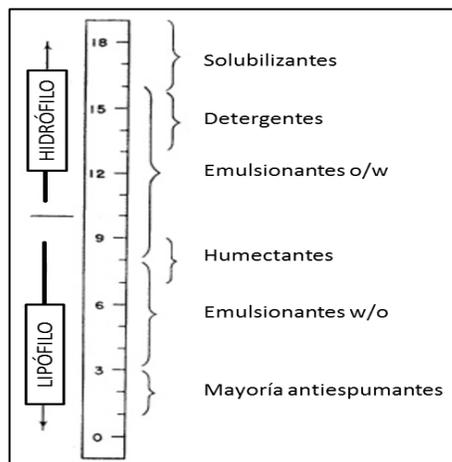
### 2.3.2.1. Escala HLB

La escala HLB (*hydrophilic-lipophilic balance*), que en español se traduce como balance hidrofílico-lipofílico, es una forma de representar semicuantitativamente la regla de Bancroft que se utiliza para seleccionar al emulgente que mejor interactúe con las fases. Un emulgente lipofílico se utiliza para formar emulsiones del tipo W/O, mientras que los emulgentes hidrofílicos se utilizan para formar emulsiones del tipo O/W.

Esta escala se encuentra en un rango de 0 a 19, siendo 0 la tendencia en un 100 % lipofílica y el 19 el 100 % de tendencia hidrofílica. Según la escala, para valores menores de 10 HLB se obtendrían emulsiones W/O, mientras que para las emulsiones del tipo O/W el valor de HLB es mayor a 10.<sup>6</sup>

El concepto HLB es una función del porcentaje en peso de la parte hidrofílica de la molécula de carácter no iónico de un agente emulgente, y es de dicha parte que se obtiene el número representado en la escala de Griffin.<sup>7</sup>

Figura 6. Escala HLB



Fuente: Angarmonte. *Clasificación HLB según Griffin*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio\\_hidr%C3%B3filo-lipof%C3%ADlico#/media/File:Clasificaci%C3%B3n\\_HLB.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_hidr%C3%B3filo-lipof%C3%ADlico#/media/File:Clasificaci%C3%B3n_HLB.png). Consulta: 9 de enero de 2019.

<sup>6</sup> FERNÁNDEZ, Alejandro. *Preparación, caracterización y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W*. p. 126.

<sup>7</sup> BOYD, John.; PARKINSON, Christian y SHERMAN, Peter. *Factors affecting emulsion stability, and the HLB concept*. p. 215.

Con la escala presentada en la Figura 6, se puede caracterizar al emulgente y al tipo de emulsión que puede formar. El método de cálculo se realiza mediante la suma de los componentes presentes en las fases oleosa y acuosa con su porcentaje presente en emulsión, y así se determina el tipo de emulsión y su emulgente ideal.

## **2.4. Mecanismos de ruptura de emulsiones**

Estos mecanismos de ruptura son resultados físicos visibles de la inestabilidad de la emulsión que, en cierto periodo, se logra observar. Estos fenómenos son propios de la naturaleza de las fases y del emulgente que comprenden la emulsión.

### **2.4.1. Cremado**

Se llama cremado a la aglomeración de gotas de la fase dispersa en la superficie de la emulsión. La densidad de la fase dispersa es menor que la de la fase continua, por lo cual el líquido se “sedimenta inversamente”. Cuanto más pequeñas sean las gotas, tanto más tardará la emulsión en perder su estabilidad; y mientras más viscosa sea la fase continua, la estabilidad de la emulsión permanecerá por un tiempo prolongado.<sup>8</sup>

### **2.4.2. Floculación**

“Es la adhesión superficial de gotas sin que pierdan su identidad, es decir se adhieren mas no forman gotas de mayor tamaño. La adhesión de las gotas genera flóculos que tienden a sedimentarse”.<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> BOYD, John.; PARKINSON, Christian; SHERMAN, Peter. *Factors affecting emulsion stability, and the HLB concept*. p.126.

<sup>9</sup> *Ibíd.*

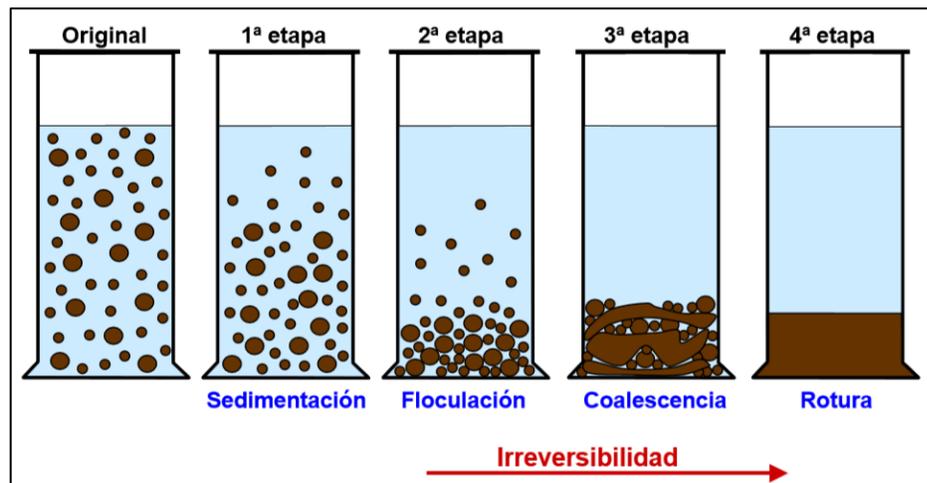
### 2.4.3. Coalescencia

Similar a la floculación pero a causa de las colisiones entre gotas, el contenido de ellas es difundido por transferencia de masa generando gotas de mayor tamaño. Estas gotas mayores se siguen aglomerando facilitando su sedimentación lo que genera dos fases totalmente separadas.<sup>10</sup>

### 2.4.4. Rotura

La rotura es el paso final, donde las gotas se difundieron completamente entre sí llevando a la separación por completo de las fases acuosa y oleosa. Este fenómeno es completamente irreversible por simple agitación.

Figura 7. Mecanismos de ruptura de emulsiones



Fuente: PERRÉ, Patrick. *Estudio detallado de un modelo de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de medios porosos.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931088900841>. Consulta: 19 de mayo de 2019.

<sup>10</sup> BOYD, John.; PARKINSON, Christian y SHERMAN, Peter. *Factors affecting emulsion stability, and the HLB concept.* p. 126.

## 2.5. Preformulación

Una preformulación se utiliza para enumerar diferentes componentes, principios activos y/o excipientes con sus respectivas concentraciones, y que van interaccionar entre sí para dar vida a una nueva formulación de un medicamento o producto. En esta etapa se hace uso del *Handbook of pharmaceutical excipients* para conocer sus principales características y usos, como su solubilidad, sus interacciones peligrosas con otros compuestos, y su rango de concentraciones sugerido para su uso en una formulación.

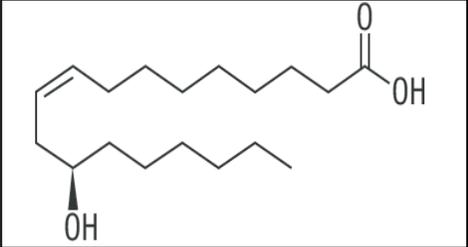
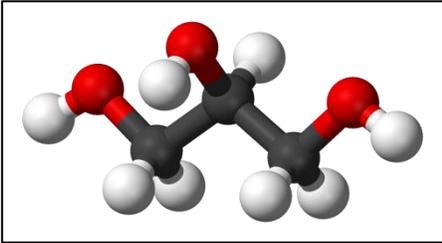
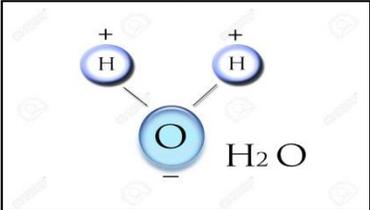
En esta etapa se preseleccionaron diferentes sustancias que ayudarán a proteger, dar brillo y estabilizar la emulsión de betún líquido para zapatos. En la siguiente tabla se enlistan los componentes propuestos para la emulsión:

Tabla I. **Sustancias preseleccionadas para emulsión de betún líquido (parte1)**

Sustancia	Descripción	Molécula
a) Cera blanca	Es parcialmente soluble en alcoholes y soluble en aceites grasos y volátiles. Muy buen humectante y estabilizante debido a su viscosidad. Su uso en la formulación será de agente humectante y de brillo para los zapatos.	<p>Cera blanca</p> <p>Éster</p> $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{28}\text{CH}_2-\text{O}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3$ <p>Una cera</p> <p>Alcohol      Ácido graso</p>
b) Cera carnauba	Se extrae de hojas de <i>Copernicia prunifera</i> , un tipo de palma. Es conocida como la reina de las ceras debido a que produce un efecto brillante y brinda resistencia al desgaste sobre las superficies en las cuales se aplica. Su uso en la formulación será para dar brillo y proteger el calzado.	<p>Cera carnauba</p> $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{24}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-(\text{CH}_2)_{29}-\text{CH}_3$ <p>Cera de carnaúba</p>

Fuente: CLAUSEN Moesha. *Lípidos*. <https://www.slideserve.com/moesha/lipidos>. Consulta: 9 de enero de 2019.

Tabla II. **Sustancias preseleccionadas para emulsión de betún líquido (parte 2)**

Emulgente	Descripción	Molécula
c) Aceite de ricino	Proviene de las semillas de la planta <i>Ricinus communis</i> , es un líquido viscoso amarillento que se utiliza en diferentes productos como lubricante o en cosméticos como protector de la piel e hidratante. Su uso en esta formulación es la protección del cuero del calzado manteniendo suave e hidratado el mismo.	<p>Aceite de ricino</p> 
d) Glicerol	Líquido incoloro y espeso. Soluble en agua y muy higroscópico. Su temperatura de ebullición es de 290 °C y a partir de ésta comienza a descomponerse. Abrillanta superficies y limpia. Su uso en esta formulación es la de limpiar, dar brillo y mantener hidratada la superficie del calzado.	<p>Glicerol</p> 
e) Agua desmineralizada	Su diferencia del agua potable de uso doméstico se encuentra en que a esta se le han sido retirados sus sales y minerales, por tanto posee baja conductividad. Su uso en la formulación es de solvente mayor.	<p>Agua</p> 

Fuente: SAMARKINA, Svetlana. *Química de los medicamentos de hierro: propuestas educativas contextualizadas*. [https://es.123rf.com/photo\\_17694733\\_mol%C3%A9cula-f%C3%B3rmula-agua-h2o.html](https://es.123rf.com/photo_17694733_mol%C3%A9cula-f%C3%B3rmula-agua-h2o.html). Consulta: 9 de enero de 2019.

## 2.6. Estudio de estabilidad acelerada

Un estudio de estabilidad acelerada en emulsiones se realiza para determinar el tiempo en el cual el emulgente mantendrá a las gotas de la fase dispersa suspendidas en la fase continua a condiciones ambientales normales.

Este estudio se realiza cuando se formulan nuevos productos con el objetivo de emular el comportamiento que estos tendrán a largo plazo durante su vida de anaquel.

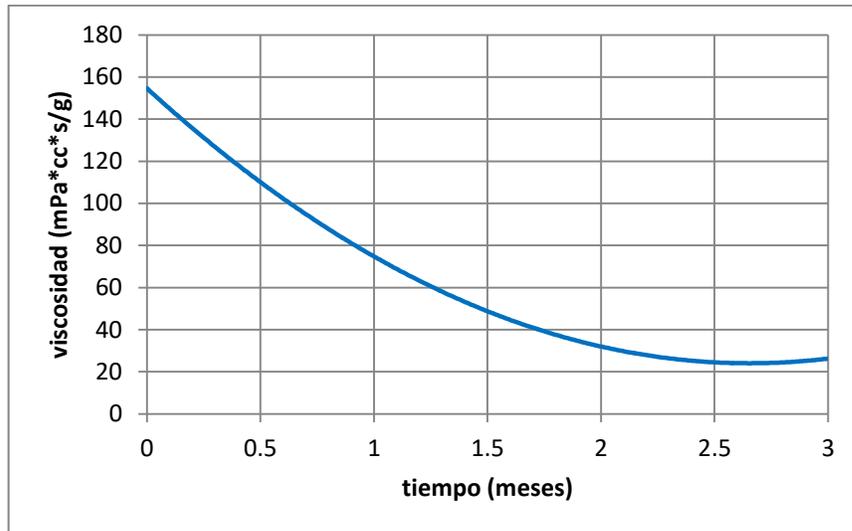
El diseño del proceso de estabilidad acelerada puede incluir altas y bajas temperaturas, humedades y exposición intensa a la luz.<sup>11</sup> Con este estudio se busca degradar las emulsiones durante el período de tres meses de incubación, y de esta manera evaluar si estas se mantendrán estables durante un período de uno a dos años.

Los datos se analizan en una gráfica de comportamiento en función del tiempo, de la cual se obtiene el modelo cinético que caracterizará la estabilidad de la emulsión a largo plazo. A continuación, en la 0, se muestra un ejemplo de este comportamiento.

---

<sup>11</sup> US ROJAS, Jennifer. *Estudio de estabilidad acelerada en lotes piloto de un gel exfoliante elaborado a base de cáscara de huevo por medio de la cuantificación de calcio disuelto*. p. 14.

Figura 8. **Gráfico de viscosidad en función del tiempo**



Fuente: elaboración propia.

### 2.6.1. **Análisis cinético de proceso**

El análisis cinético de proceso se llevó a cabo exponiendo las diferentes formulaciones de la emulsión a variaciones de temperatura para que se degraden las propiedades de la emulsión y de esta manera forzar su rotura. La difusión de las gotas entre sí de la fase dispersa en sus primeras coalescencias determinará la velocidad de rotura de la emulsión en función del tiempo.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Variables

Las variables son de carácter cuantitativo con el fin de determinar los rangos en los cuales la emulsión permanece estable.

Tabla III. Definición operacional de las variables cuantificables

No.	Variable	Unidad	Tipo de Variable	
			Independiente	Dependiente
1	Tiempo (t)	meses	X	
2	Concentración (C)	g - mL	X	
3	Temperatura (T)	°C	X	
4	Viscosidad dinámica ( $\mu$ )	mPa*s		X
5	Viscosidad cinemática ( $\nu$ )	(mPa*cc*s/g)		X
6	Densidad ( $\rho$ )	g/mL		X
7	pH	-		X

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2. Delimitación de campo de estudio

A continuación, se describe la delimitación de campo de estudio.

##### 3.2.1. Área de conocimiento

Fundamento del conocimiento: química básica y fisicoquímica.

### **3.2.2. Proceso**

Se sometieron a un estudio de estabilidad acelerada las emulsiones de betún líquido de zapatos, donde se evaluaron comparativamente los diferentes emulgentes que les dieron estabilidad a las emulsiones a diferentes concentraciones y condiciones de temperatura.

### **3.2.3. Ubicación**

La experimentación y toma de datos se realizó en la empresa Lafimarq ubicada en la zona 1, Guatemala.

## **3.3. Recursos humanos disponibles**

La formulación y preparación de las emulsiones, análisis e interpretación de los resultados estuvieron a cargo del estudiante Javier Eduardo Ayala Angeles bajo la tutela de la ingeniera química Dinna Lissette Estrada Moreira y del ingeniero químico William Eduardo Fagiani Cruz.

## **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para la realización de la parte experimental del trabajo de graduación, se necesitaron los siguientes materiales y equipos.

### **3.4.1. Materiales y suministros**

Los siguientes reactivos fueron utilizados para las formulaciones de las emulsiones de betún líquido.

Tabla IV. **Listado de reactivos utilizados**

<b>Reactivos</b>
Cera blanca
Cera carnauba
Aceite de ricino
Goma Xantan
Tween 20
Tween 80
Lauril sulfato de sodio
Negro nigrosina
Glicerina
Agua desmineralizada

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2. **Mobiliario y equipo**

En la siguiente tabla se encuentra enlistado los equipos y materiales utilizados durante la experimentación.

Tabla V. **Nombre del equipo, accesorios y cristalería por utilizar**

<b>Equipo</b>	<b>Cristalería</b>
Viscosímetro digital NDJ-9S	Balón aforado de 250 mL
Balanza analítica Mettler PC 400 precisión 0,001g	Beaker's de 50, 100 y 1 000 mL
Refrigerador LG modelo GR30W12CPC de 241L de capacidad	Probetas de 10, 50 y 100 mL
Incubadora marca Barnstead modelo 150	Vidrio reloj
Potenciómetro Isolab Laborgerate GmbH	Varilla de agitación
Hornilla eléctrica	Crisol
Termómetro digital de bolsillo marca UEi modelo PDT650	Pizeta

Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

A continuación, se detallará el procedimiento cuantitativo que se utilizó para la investigación:

#### 3.5.1. Preformulación de emulsiones

Utilizando el *Handbook of pharmaceutical excipients*, se preformularon las emulsiones de betún líquido como se muestra en Tabla VI:

Tabla VI. Preformulación de emulsiones

Reactivo	Fórmula 1		Fórmula 2		Fórmula 3	
	%	g	%	g	%	g
Aceite de ricino	3	7,5	3	7,5	3	7,5
Cera carnauba	3	7,5	3	7,5	3	7,5
Goma xantan	0,04	0,1	0,04	0,1	0,04	0,1
Emulgente	16	40	12	30	8	20
Glicerina	1	2,5	1	2,5	1	2,5
Agua (CSP)	76,96	192,4	80,96	202,4	84,96	212,4
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>250</b>	<b>100</b>	<b>250</b>	<b>100</b>	<b>250</b>

Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Tabla VI, la concentración de emulgente varía de la fórmula uno a la tres en 16, 12 y 8 % de concentración. Los emulgentes utilizados fueron Tween 80, Tween 20 y lauril sulfato de sodio, para un total de nueve formulaciones.

### **3.5.2. Preparación de emulsiones y formulación final**

Se procedió a preparar las emulsiones de betún con las formulaciones propuestas en la parte anterior. Se mezcló la parte hidrofílica de la emulsión, agua, glicerina, goma xantan y el emulgente a una temperatura de 50 °C. Posterior a ello, se fundió la cera carnauba a 90 °C y luego se mezcló con el aceite de ricino para tener junta a la fase oleosa. Finalmente se mezclaron las fases oleosa y acuosa en un volumen final de 250 mL, y se mantuvo una agitación constante por 10 minutos. Todas las formulaciones se prepararon de la misma manera.

Luego de un mes de observación, las tres formulaciones que contenían lauril sulfato de sodio como emulgente presentaron el mecanismo de ruptura de coalescencia para finalmente separarse en sus fases oleosa y acuosa, por tanto, se rechazó al lauril sulfato de sodio como emulgente estable para el betún líquido para zapatos.

Las otras seis formulaciones de betún se mantuvieron estables durante el mes de observación, sin embargo, se observó presencia de moho en ellas, por lo tanto, se añadió a la formulación metilparabeno y propilparabeno al 0,02 y 0,01 % respectivamente, para evitar la contaminación del producto en el futuro.

Con la formulación final establecida se procedió a repetir el experimento utilizando la metodología mencionada anteriormente, disolviendo el metilparabeno y el propilparabeno en agua a 90 °C previo a su mezcla con la fase acuosa.

### **3.5.3. Estudio de estabilidad acelerada**

El estudio de estabilidad acelerada es un procedimiento que se realiza para predecir el comportamiento que tendrá un nuevo producto como los fármacos y las emulsiones, durante su vida de anaquel. Este estudio se puede realizar exponiendo el producto a condiciones extremas de temperatura, humedad y luz solar en un período de tres meses, donde se busca emular la degradación que tendrá el producto a largo plazo.<sup>12</sup>

Durante el estudio de estabilidad acelerada, se tomaron tres muestras de cada formulación de betún, y se mantuvieron en incubación a 40, 25 y 10 °C cada una. Se tomó una muestra de cada formulación en incubación durante el inicio del estudio de estabilidad (mes cero), donde se le midió la viscosidad dinámica, densidad y potencial de hidrógeno (pH). Este procedimiento se realizó al final de cada mes durante tres meses. A su vez, se controló la apariencia visual de las emulsiones a las tres temperaturas, observando la aparición o la ausencia de los mecanismos de ruptura principales de las emulsiones.

Del estudio de estabilidad acelerada se obtuvieron gráficas de comportamiento de la viscosidad cinemática en función del tiempo. A partir de este se pudo plantear un modelo matemático que puede predecir el tiempo en que la emulsión conservará sus condiciones óptimas de estabilidad en un año, y de esta manera seleccionar para el producto final un emulgente de los tres seleccionados a una concentración determinada.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Los datos recolectados y la formulación final de la emulsión de betún líquido se describen de la siguiente manera.

---

<sup>12</sup> US ROJAS, Jennifer. *Estudio de estabilidad acelerada en lotes piloto de un gel exfoliante elaborado a base de cáscara de huevo por medio de la cuantificación de calcio disuelto*. p. 22.

Tabla VII. **Fórmula final del betún líquido**

Fase	Reactivo	%
Oleosa	Aceite de ricino	3,0
	Cera carnauba	3,0
Acuosa	Goma xantan	0,04
	Negro nigrosina	3,0
	Glicerina	1,0
	Metilparabeno	0,02
	Propilparabeno	0,01
	Agua desmineralizada	CSP

Fuente: elaboración propia.

Se elaboraron nueve emulsiones añadiendo a la fórmula final los emulgentes Tween 80, Tween 20 y lauril sulfato de sodio, variando la concentración de cada uno tres veces.

### 3.6.1. Datos originales

Los datos originales fueron recolectados de la siguiente manera.

Tabla VIII. **Formulación de betún líquido con Tween 80 al 16 %**

Fórmula	Mes	T (°C)	$\mu$ (mPa*s)	$\rho$ (g/mL)	pH
1	0	25	15,28	0,9855	4,71
		40	11,14	0,9864	4,61
		10	14,58	0,9841	4,69
	1	25	15,29	0,9863	4,68
		40	11,36	0,9898	4,58
		10	14,10	0,9806	4,62
	2	25	14,09	0,9890	4,60
		40	11,30	0,9938	4,54
		10	13,32	0,9789	4,59
	3	25	13,12	0,9879	4,43
		40	11,72	0,9898	4,40
		10	14,31	0,9768	4,46

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Formulación de betún líquido con Tween 80 al 12 %**

Fórmula	Mes	T (°C)	$\mu$ (mPa*s)	$\rho$ (g/mL)	pH
2	0	25	8,26	0,9977	5,86
		40	7,22	0,9985	5,65
		10	7,58	0,9974	5,54
	1	25	6,10	1,0012	5,79
		40	5,45	1,0011	5,22
		10	6,77	0,9917	5,44
	2	25	4,21	0,9923	5,60
		40	3,62	0,9962	5,31
		10	4,45	0,9840	5,32
	3	25	5,90	0,9765	5,75
		40	4,30	0,9871	5,96
		10	5,14	0,9753	5,66

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Formulación de betún líquido con Tween 80 al 8 %**

Fórmula	Mes	T (°C)	$\mu$ (mPa*s)	$\rho$ (g/mL)	pH
3	0	25	9,72	0,9851	5,71
		40	7,92	0,9968	5,16
		10	10,85	0,9864	5,32
	1	25	12,79	0,9859	5,33
		40	7,00	0,9906	5,26
		10	13,74	0,9699	5,24
	2	25	12,92	0,9818	4,47
		40	7,03	0,9834	4,11
		10	7,61	0,9625	4,45
	3	25	8,82	0,9821	4,35
		40	7,46	0,9817	4,08
		10	10,42	0,9592	4,34

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Formulación de betún líquido con Tween 20 al 16 %**

Fórmula	Mes	T (°C)	$\mu$ (mPa*s)	$\rho$ (g/mL)	pH
4	0	25	20,51	0,9791	6,39
		40	18,25	0,9895	5,96
		10	23,81	0,9737	6,10
	1	25	16,94	0,9866	6,18
		40	14,00	0,9868	5,47
		10	16,43	0,9858	6,04
	2	25	13,18	0,9853	5,20
		40	14,97	0,9896	4,78
		10	19,68	0,9829	4,95
	3	25	16,28	0,9828	4,59
		40	10,07	0,9854	4,38
		10	14,97	0,9838	4,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Formulación de betún líquido con Tween 20 al 12 %**

Fórmula	Mes	T (°C)	$\mu$ (mPa*s)	$\rho$ (g/mL)	pH
5	0	25	10,33	0,9868	5,14
		40	8,31	0,9898	5,04
		10	11,31	0,9811	5,16
	1	25	8,86	0,9875	4,68
		40	7,52	0,9902	4,50
		10	9,79	0,9838	4,62
	2	25	8,44	0,9881	4,60
		40	6,68	0,9910	4,57
		10	8,13	0,9836	4,39
	3	25	8,04	0,9555	4,29
		40	6,12	0,9604	4,14
		10	8,16	0,9559	4,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Formulación de betún líquido con Tween 20 al 8 %**

Fórmula	Mes	T (°C)	$\mu$ (mPa*s)	$\rho$ (g/mL)	pH
6	0	25	5,63	0,9706	5,93
		40	5,38	0,9736	5,47
		10	6,37	0,9619	5,66
	1	25	5,25	0,9730	5,83
		40	4,48	0,9761	5,36
		10	5,56	0,9623	5,52
	2	25	4,20	0,9696	5,67
		40	3,47	0,9766	5,28
		10	4,67	0,9663	5,51
	3	25	3,93	0,9710	5,45
		40	3,40	0,9721	5,21
		10	4,15	0,9630	5,36

Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Análisis estadístico

Para el análisis de la información se realizaron las pruebas estadísticas descritas a continuación.

#### 3.7.1. Análisis de correlación $R^2$

Es utilizado en modelos estadísticos y sus principales propósitos es probar hipótesis, predecir futuros resultados y/o determinar la calidad del modelo para replicar sus resultados, así como la proporción de variación de los resultados que pueden explicarse mediante el modelo obtenido por medio de una regresión lineal.

#### 3.7.2. Análisis de varianza

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes

niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.<sup>13</sup>

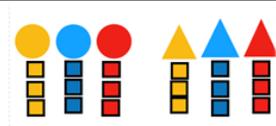
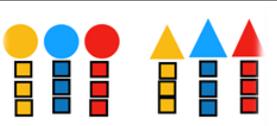
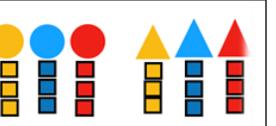
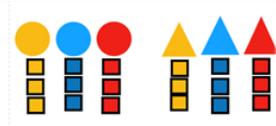
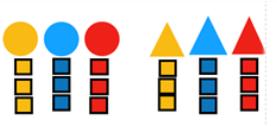
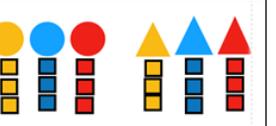
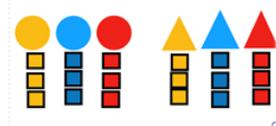
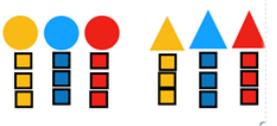
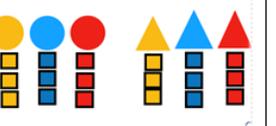
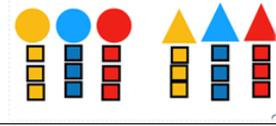
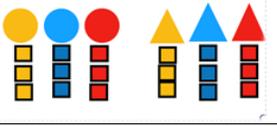
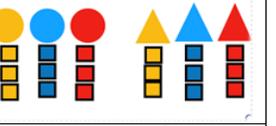
Los factores de aceptación de la hipótesis nula ( $h_0$ ) son los valores de las medias de viscosidad que no difieren significativamente entre sí al variar los intervalos de tiempo utilizando un nivel de significancia del 5 %. Por su parte, la hipótesis alterna ( $h_a$ ) indica que al menos uno de los valores de las medias de viscosidad difiere significativamente del resto al variar los intervalos de tiempo utilizando un nivel de significancia del 5 %.

En la Figura 9 se resume el análisis de este experimento donde los cuadros representan las repeticiones por corrida; las figuras representan a los emulgentes siendo el círculo el Tween 80 y el triángulo el Tween 20; los colores representan las diferentes concentraciones siendo rojo el 8 %, amarillo el 12 % y azul el 16 %.

---

<sup>13</sup> Minitab 18. ¿Qué es ANOVA?. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>.

Figura 9. Descripción del análisis experimental

Mes/Temperatura	10 °C	25 °C	40 °C
0			
1			
2			
3			
			

Fuente: elaboración propia.

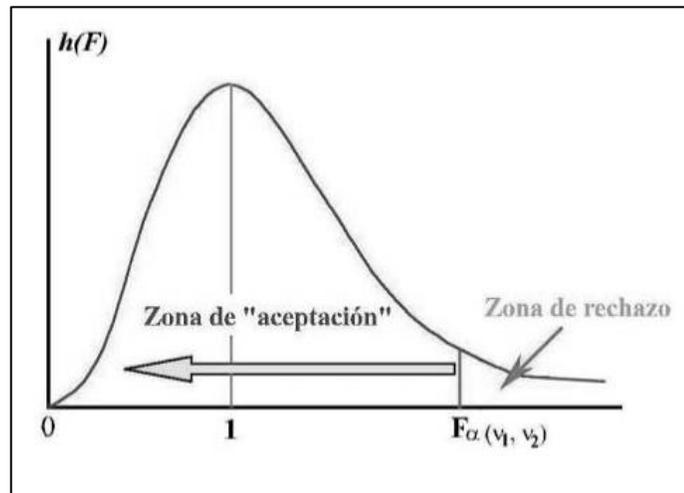
### 3.7.3. Distribución F

Es una distribución de probabilidad de la razón de dos varianzas que provienen de dos poblaciones distintas. Es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de una razón específica mediante el uso de esta distribución. La función F es una función continua, asimétrica, su valor no puede ser negativo, y varían del cero al infinito. Su cálculo se representa como:

$$F = \frac{S_1^2 / \sigma_1^2}{S_2^2 / \sigma_2^2}$$

Gráficamente (Figura 10), la distribución F determina los límites de aceptación de la hipótesis nula ( $h_0$ ).

Figura 10. **Gráfica de distribución F**



Fuente: BARRAGÁN, Gino. *Distribución F de Fisher*. <https://es.slideshare.net/GinOasis/2012-3-distribucionffisher>. Consulta: 14 de octubre de 2018.

#### 3.7.4. **Análisis de residuos**

El residuo expresado matemáticamente es la diferencia entre el valor obtenido en la experimentación y el valor estimado por el modelo. El análisis de residuos está basado en gráficas que indican si el modelo empleado para una regresión es significativamente adecuado para una predicción de variables dependientes.

### **3.7.5. Estimación del tiempo de vida de las emulsiones**

Al haber definido la formulación más estable y con mejor predicción de viscosidad cinemática, se caracteriza la viscosidad cinemática en función del tiempo a 25 °C proyectada a cinco años, utilizando la ecuación regresora. La curva de la viscosidad cinemática irá disminuyendo progresivamente en función del tiempo hasta presentar un comportamiento casi asintótico donde probablemente se romperá la emulsión.

Por lo tanto, el tiempo máximo de almacenamiento es el punto medio entre el descenso abrupto de la viscosidad y la asíntota, tomando en cuenta que el método de estabilidad acelerada está probado para un máximo de dos años. La Figura 50, presente en la sección de resultados, describe esta estimación para este trabajo de investigación.

### **3.8. Plan de análisis de los resultados**

A continuación, se detallan los programas que fueron de utilidad para el almacenamiento de datos, análisis de los resultados y control estadístico.

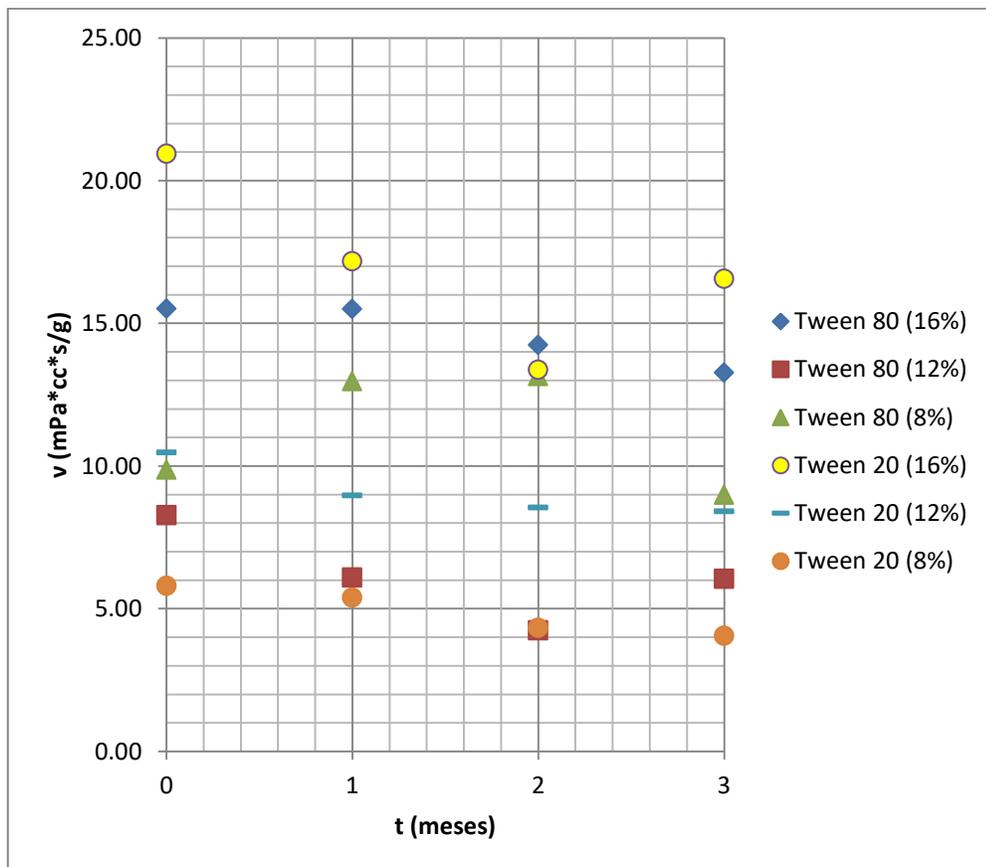
#### **3.8.1. Programas por utilizar para análisis de datos**

Para la manipulación estadística de datos se usó InfoStat en su versión estudiantil, por la facilidad de uso y la interacción sencilla con el usuario. A su vez, se usó la herramienta de Microsoft Excel 2010 para ordenar la información y cálculos. Para otras operaciones matemáticas se utilizó la calculadora Voyage 200.

## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los datos obtenidos de viscosidad cinemática en función del tiempo para las seis formulaciones aceptadas de betún líquido para zapatos.

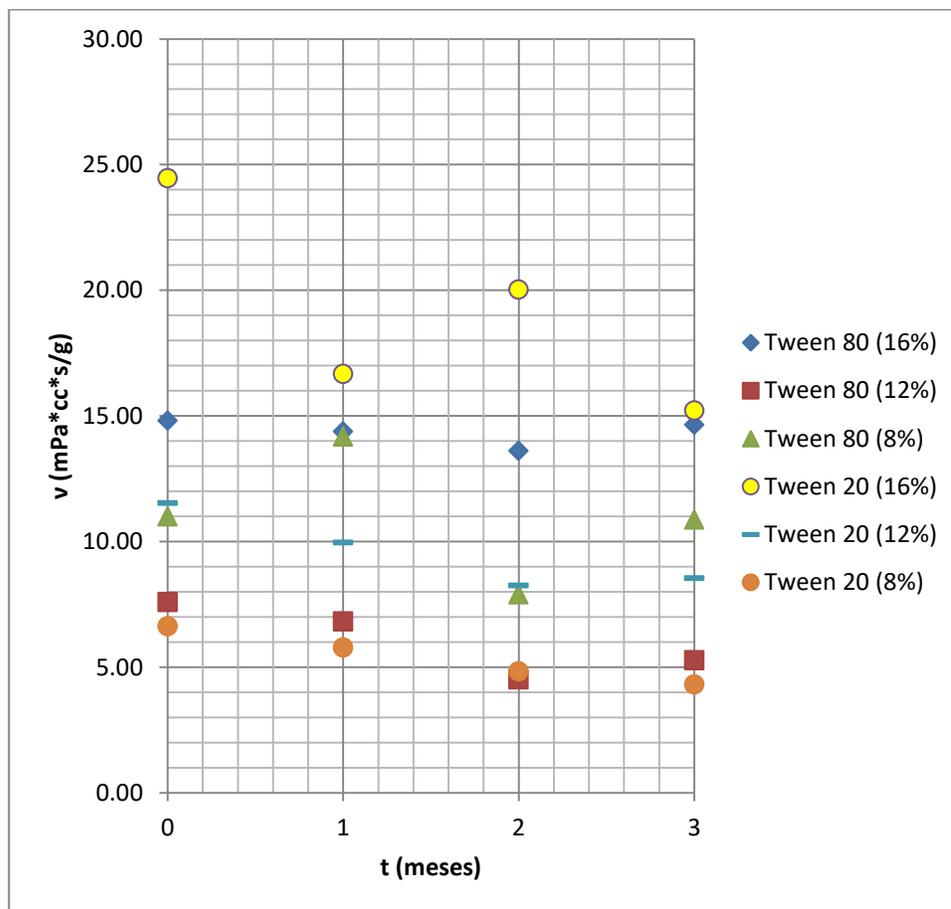
Figura 11. **Viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en función del tiempo a 25 °C de temperatura de incubación**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2010.

En la Figura 11 se observa el comportamiento de la viscosidad cinemática en función del tiempo para las seis formulaciones de betún. En el caso de las formulaciones con Tween 20 al 12 % y 8 % y Tween 80 al 16 %, la viscosidad tendió a disminuir durante la incubación. El Tween 20 al 16 % y Tween 80 al 12 % la viscosidad disminuyó y luego aumentó para el último mes. Para el Tween 80 al 8 % la viscosidad se comportó de manera parabólica.

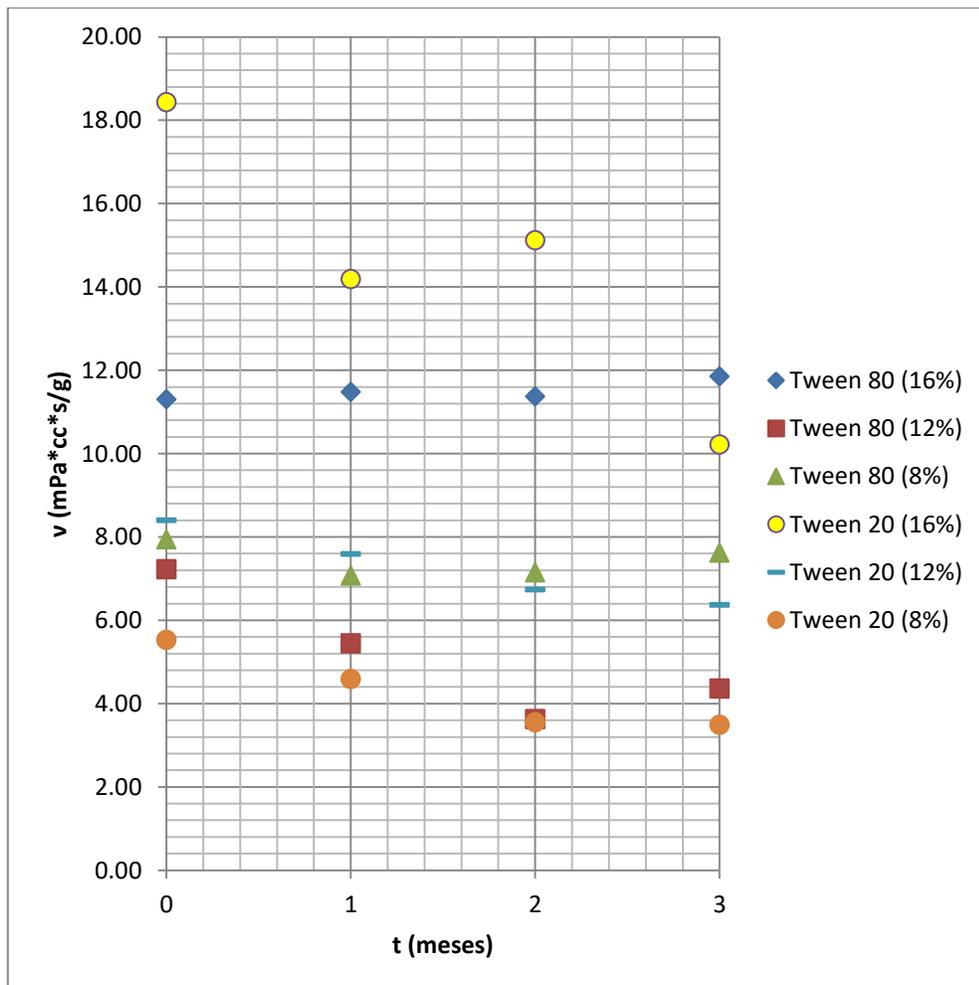
Figura 12. **Viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en función del tiempo a 10 °C de temperatura de incubación**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2010.

En la figura 12 se observa como las formulaciones con Tween 80 al 16 % y 12 %, y Tween 20 al 12 % y 8 % mostraron una disminución en su viscosidad en función del tiempo. En el caso del Tween 80 al 8 % y Tween 20 al 16 % la viscosidad presentó cambios ascendentes y descendentes en función del tiempo de incubación.

Figura 13. **Viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en función del tiempo a 40 °C de temperatura de incubación**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2010.

En la figura 13 se presenta la degradación acelerada de las emulsiones. La viscosidad cinemática muestra una disminución constante para las formulaciones con Tween 20 al 12 % y 8 % en función del tiempo. Caso contrario la formulación con Tween 80 al 16 % presentó una tendencia ligeramente ascendente, mientras que para el Tween 80 al 12 % tendió a disminuir y aumentar ligeramente en el mes final. La formulación con Tween 80 al 8 % mantuvo una tendencia de viscosidad parabólica mientras que la de Tween 20 al 16 % presentó grandes fluctuaciones de viscosidad en función del tiempo.

#### 4.1. Construcción del modelo matemático para el comportamiento de la viscosidad cinemática en el betún líquido para predecir el tiempo de vida de anaquel

En la Tabla XIV se detallan las regresiones realizadas con los distintos modelos, con el fin de obtener un modelo matemático con el mejor ajuste al comportamiento de la viscosidad cinemática en función del tiempo de incubación de las distintas formulaciones. Estas regresiones vienen de transformaciones por anamorfosis, donde el tiempo es la variable independiente y la viscosidad cinemática es la variable dependiente.

Tabla XIV. Regresiones analizadas para las formulaciones de betún líquido

	<b>t</b>	<b>ln(t)</b>	<b>1/t</b>	<b>1/t<sup>2</sup></b>	<b>1/t<sup>3</sup></b>
<b>v</b>	v : t	v : ln(t)	v : 1/t	v : 1/t <sup>2</sup>	v : 1/t <sup>3</sup>
<b>ln(v)</b>	ln(v) : t	ln(v) : ln(t)	ln(v) : 1/t	ln(v) : 1/t <sup>2</sup>	ln(v) : 1/t <sup>3</sup>
<b>1/v</b>	1/v : t	1/v : ln(t)	1/v : 1/t	1/v : 1/t <sup>2</sup>	1/v : 1/t <sup>3</sup>
<b>1/v<sup>2</sup></b>	1/v <sup>2</sup> : t	1/v <sup>2</sup> : ln(t)	1/v <sup>2</sup> : 1/t	1/v <sup>2</sup> : 1/t <sup>2</sup>	1/v <sup>2</sup> : 1/t <sup>3</sup>
<b>1/v<sup>3</sup></b>	1/v <sup>3</sup> : t	1/v <sup>3</sup> : ln(t)	1/v <sup>3</sup> : 1/t	1/v <sup>3</sup> : 1/t <sup>2</sup>	1/v <sup>3</sup> : 1/t <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Todos los modelos fueron analizados para las seis formulaciones de betún líquido aceptadas, a las tres temperaturas de incubación (10, 25 y 40 °C), utilizando el programa InfoStat.

#### 4.1.1. Emulsiones de betún en incubación a 10 °C de temperatura

La Tabla XV muestra un resumen de los modelos mejor ajustados a cada formulación. El criterio utilizado para la aceptación de los mismos fue que tuvieran una probabilidad de contraste debajo de 0,05 y con el R<sup>2</sup> más alto.

Tabla XV. Resumen de modelos aceptados y sus criterios para cada formulación de betún líquido a 10 °C

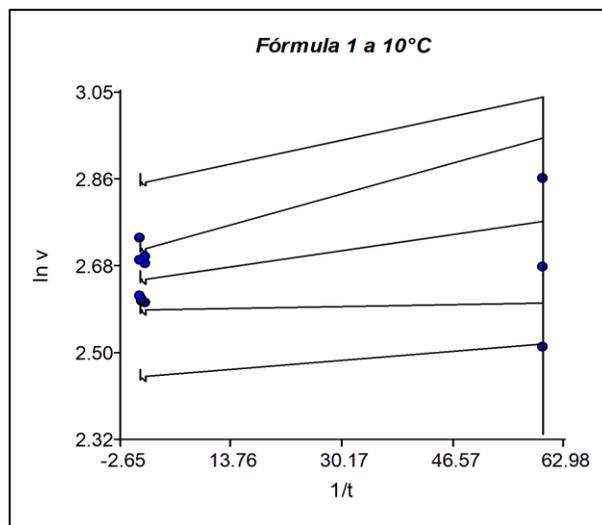
Fórmula	Modelo	R <sup>2</sup>	ECMP	AIC	BIC	CpMallows	Bondad de ajuste		Falta de ajuste	
							F	p	F	p
1	$\ln(v)=f(1/t)$	0,0273	0,0166	-19,6047	-18,15	0,2803	0,2803	0,6081	0,4601	0,6469
2	$\ln(v)=f(t)$	0,524	0,0426	-4,4428	-2,988	11,0098	11,0098	0,0078	4,7286	0,0441
3	$1/v=f(t)$	0,076	0,0008	-51,4502	-49,9954	0,8227	0,8227	0,3857	9,4472	0,0078
4	$\ln(v)=f(\ln(t))$	0,4898	0,0408	-3,6609	-2,2062	9,5986	9,5986	0,0113	1,9046	0,2106
5	$\ln(v)=f(\ln(t))$	0,3933	0,039	-4,6622	-3,2075	6,4822	6,4822	0,0291	0,5652	0,5894
6	$1/v =f(t)$	0,7989	0,0004	-60,1796	-58,7249	39,7145	39,7145	0,0001	0,1095	0,8976

Fuente: elaboración propia.

Las formulaciones con una probabilidad mayor a la significancia aceptable (5 %) están de color rojo. Por esta razón no se incluyen sus gráficos de normalidad y de residuos más adelante.

Los gráficos de residuos incluidos en esta investigación se usan para saber si el error que aporta la ecuación regresora es significativo para la predicción de la viscosidad cinemática en el tiempo.

Figura 14. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 1 a 10 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

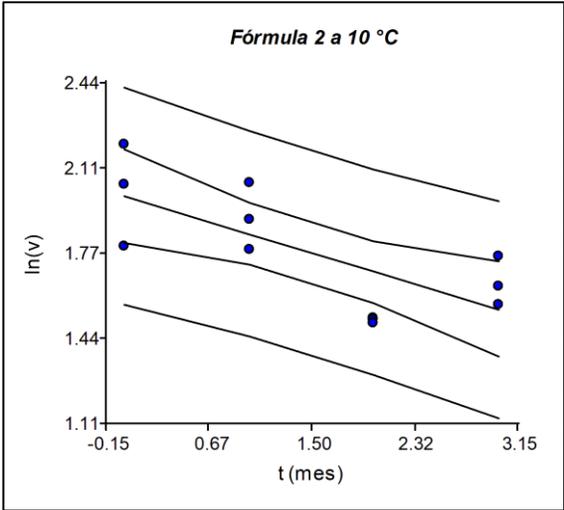
A partir de la gráfica anterior se obtuvo el siguiente modelo:

Tabla XVI. **Modelo matemático para la formulación 1 a 10 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
1	$\ln(v) = \frac{0,0005}{t} + 2,6524$	0,0685	0,0023

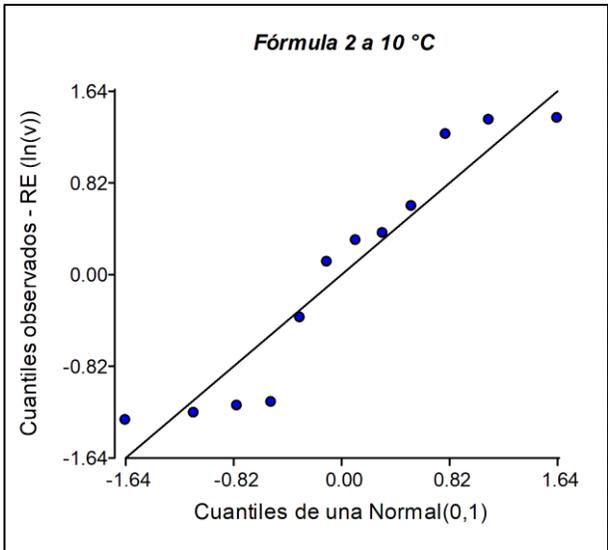
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 15. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 2 a 10 °C**



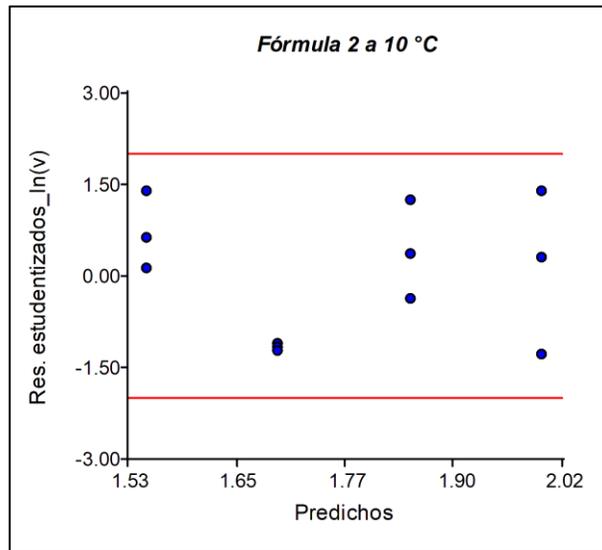
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 16. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 2 a 10 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 17. **Gráfica de residuos para la formulación 2 a 10 °C**



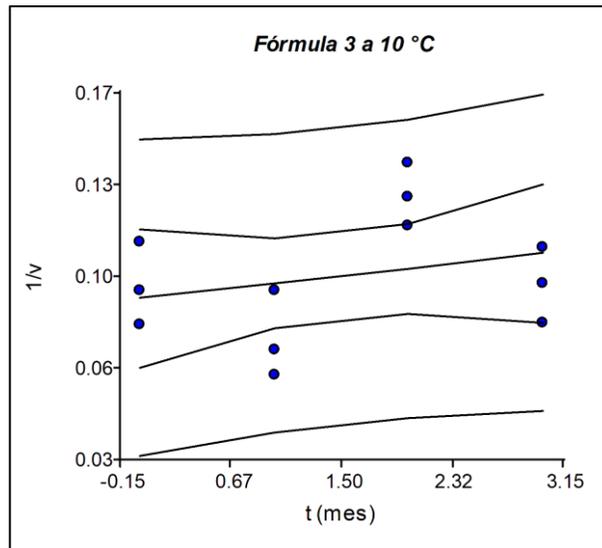
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XVII. **Modelo matemático para la formulación 2 a 10 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
2	$\ln(v) = -0,1470 t + 1,9947$	0,1846	0,0987

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 18. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 3 a 10 °C**



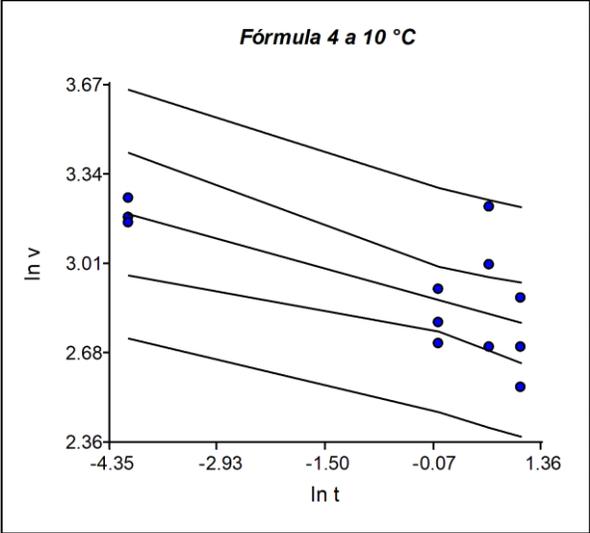
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XVIII. **Modelo matemático para la formulación 3 a 10 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
<b>3</b>	$\frac{1}{v} = 0,0057 t + 0,0881$	0,0261	0,0140

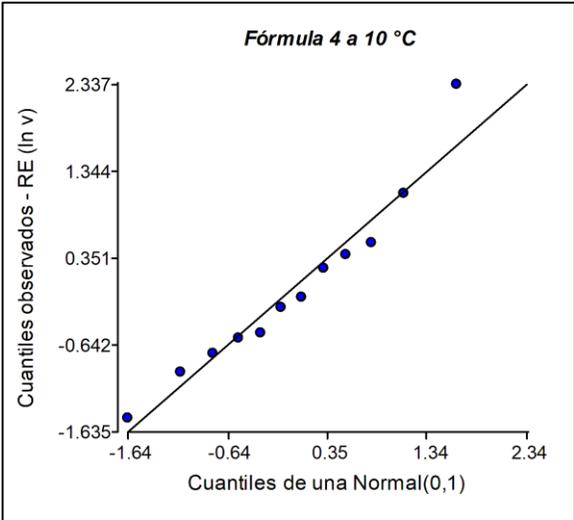
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 19. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 4 a 10 °C**



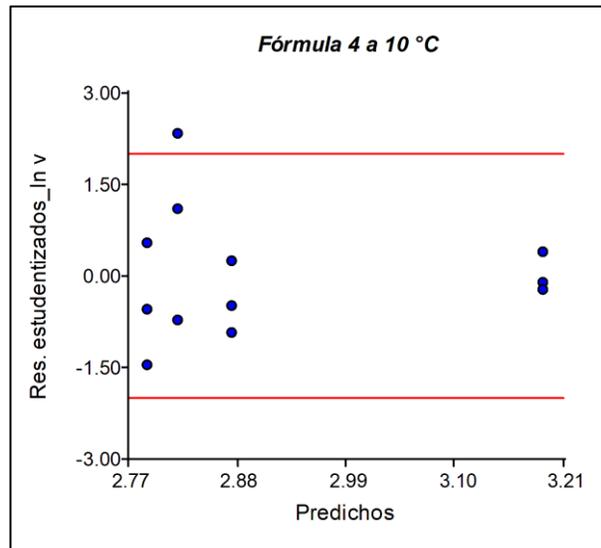
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 20. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 4 a 10 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 21. **Gráfica de residuos para la formulación 4 a 10 °C**



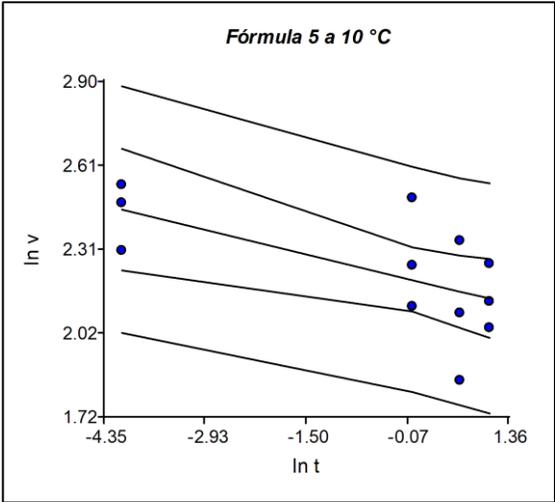
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XIX. **Modelo matemático para la formulación 4 a 10 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
4	$\ln(v) = -0,0766 \ln(t) + 2,8793$	0,1183	0,0551

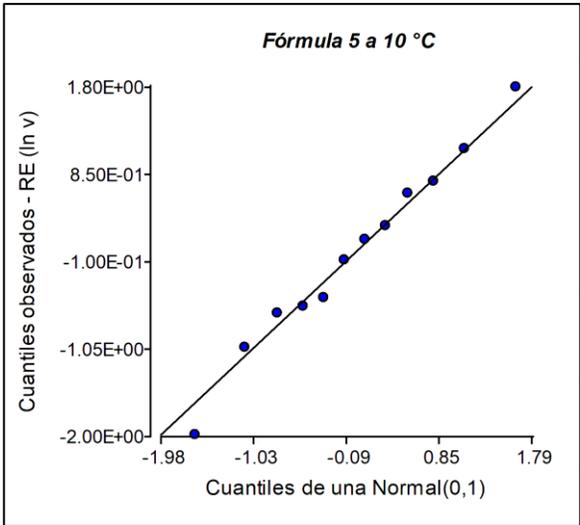
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 22. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 5 a 10 °C**



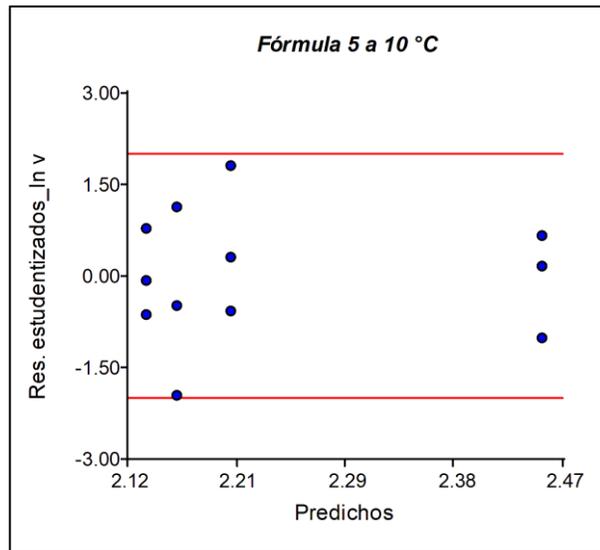
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 23. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 5 a 10 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 24. **Gráfica de residuos para la formulación 5 a 10 °C**



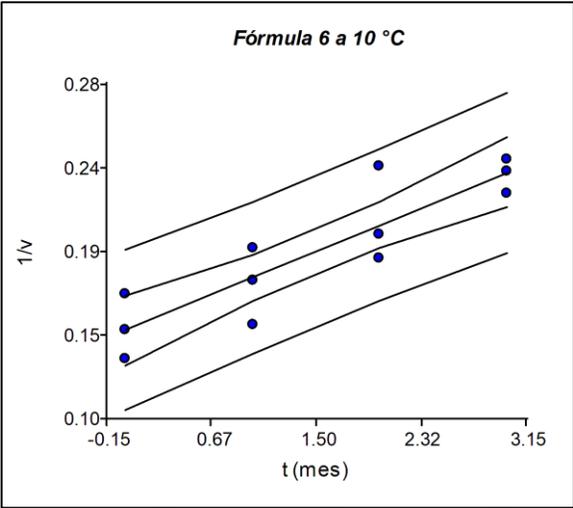
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XX. **Modelo matemático para la formulación 5 a 10 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
5	$\ln(v) = -0,0604 * \ln(t) + 2,2041$	0,1135	0,0529

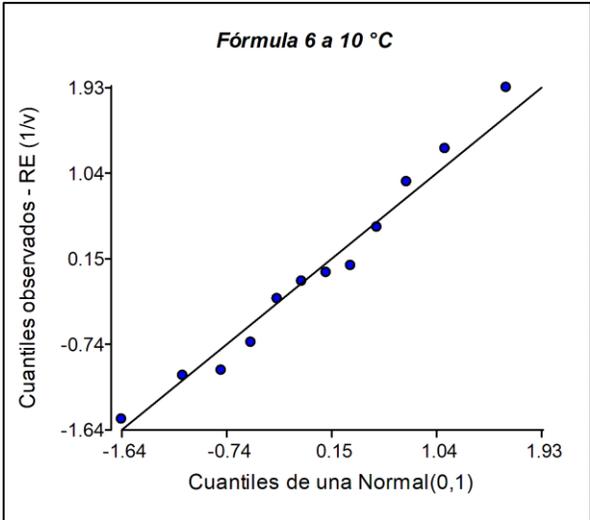
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 25. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 6 a 10 °C**



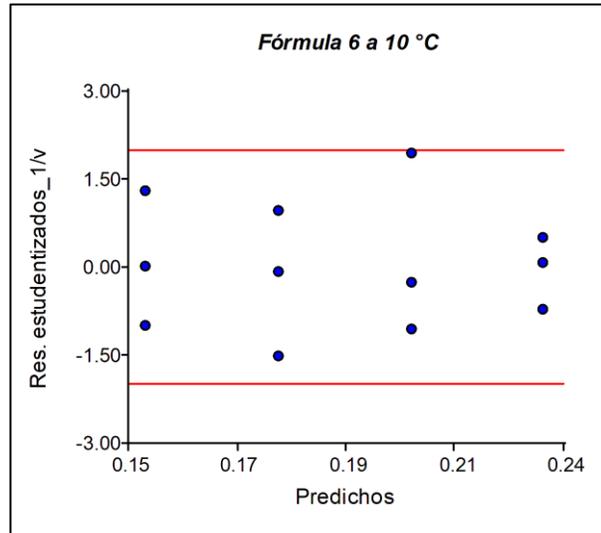
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 26. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 6 a 10 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 27. **Gráfica de residuos para la formulación 6 a 10 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXI. **Modelo matemático para la formulación 6 a 10 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
6	$\frac{1}{v} = 0,0274 t + 0,1509$	0,0181	0,0097

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

#### 4.1.2. **Emulsiones de betún líquido en incubación a 25 °C de temperatura**

La Tabla XXII muestra un resumen de los modelos mejor ajustados para cada formulación. De la misma manera que para las formulaciones a 10 °C, el criterio utilizado para la aceptación de los mismos fue que tuvieran una probabilidad de contraste menor de 0,05 y con el R<sup>2</sup> más alto.

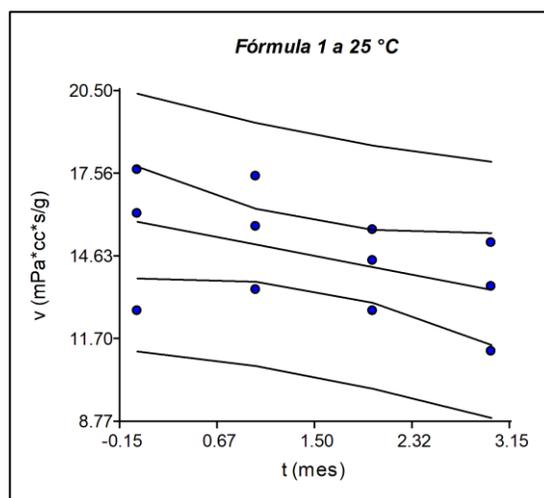
Tabla XXII. Resumen de modelos aceptados y sus criterios para cada formulación de betún líquido a 25 °C

Fórmula	Función	R <sup>2</sup>	ECMP	AIC	BIC	CpMallows	Bondad de ajuste		Falta de ajuste	
							F	p	F	P
1	$v=f(t)$	0,2183	5,161	52,5157	53,9704	2,7921	2,7921	0,1257	0,126	0,8833
2	$\ln(v)=f(\ln(t))$	0,4954	0,0596	-0,384	1,0707	9,8188	9,8188	0,0106	5,6888	0,0291
3	$\ln(v)=f(1/t^3)$	0,0565	0,1381	9,5858	11,0405	0,5987	0,5987	0,4570	1,5684	0,2663
4	$\ln(v)=f(\ln(t))$	0,2926	0,0714	1,2961	2,7508	4,1370	4,1370	0,0693	1,2579	0,335
5	$\ln(v)=f(\ln(t))$	0,1947	0,0584	-0,1884	1,2663	2,4185	2,4185	0,1510	0,0154	0,9847
6	$1/v^3 = f(t)$	0,6116	1,40E-05	-99,2708	-97,8161	15,7494	15,7494	0,0026	0,4516	0,6519

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Las formulaciones con probabilidad mayor a la significancia aceptable, o sea un 5 %, están de color rojo. Por esta razón no se incluyen sus gráficos de normalidad y de residuos más adelante.

Figura 28. Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 1 a 25 °C



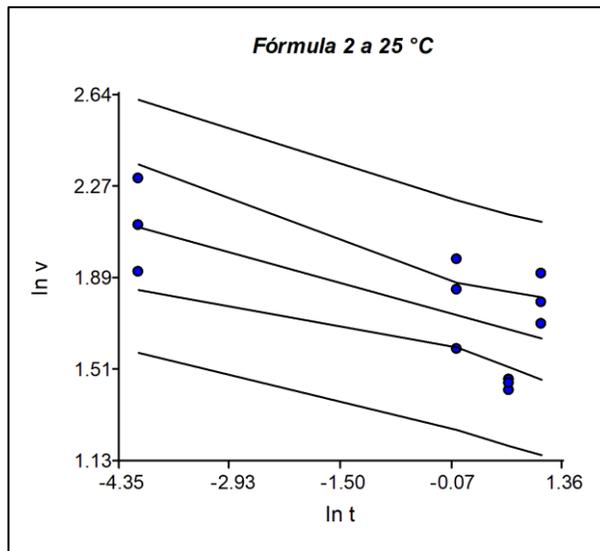
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXIII. **Modelo matemático para la formulación 1 a 25 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
1	$v = -0,7943 t + 15,3227$	1,9816	1,0592

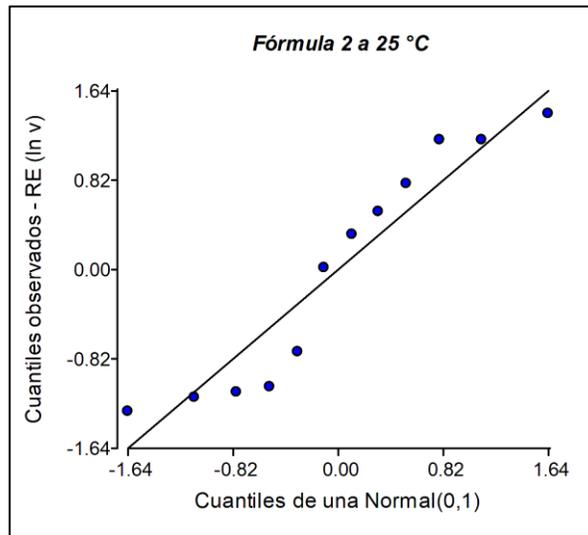
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 29. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 2 a 25 °C**



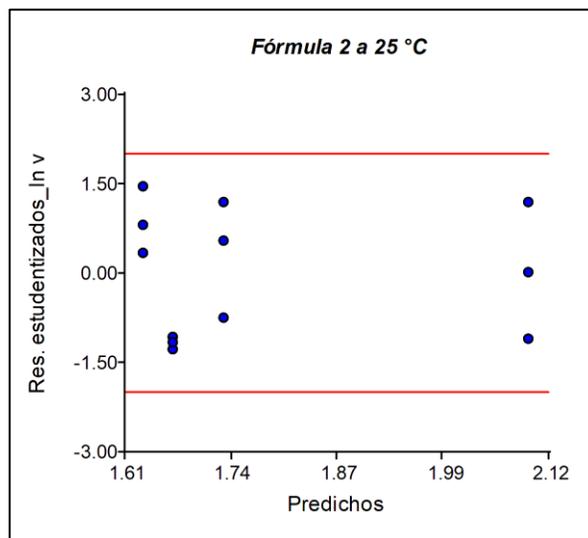
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 30. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 2 a 25 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 31. **Gráfica de residuos para la formulación 2 a 25 °C**



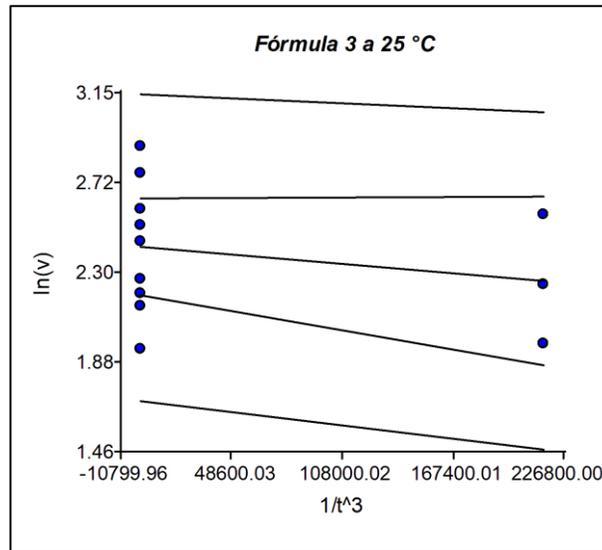
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXIV. **Modelo matemático para la formulación 2 a 25 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
2	$\ln(v) = -0,0888 \ln(t) + 1,7333$	0,1356	0,0632

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 32. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 3 a 25 °C**



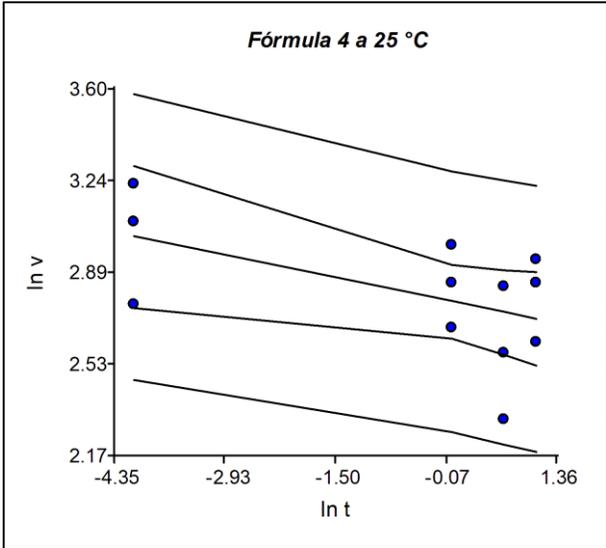
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXV. **Modelo matemático para la formulación 3 a 25 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
3	$\ln(v) = -\frac{7,40 \times 10^{-07}}{t^3} + 2,4175$	0,2286	2,15E-06

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 33. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 4 a 25 °C**



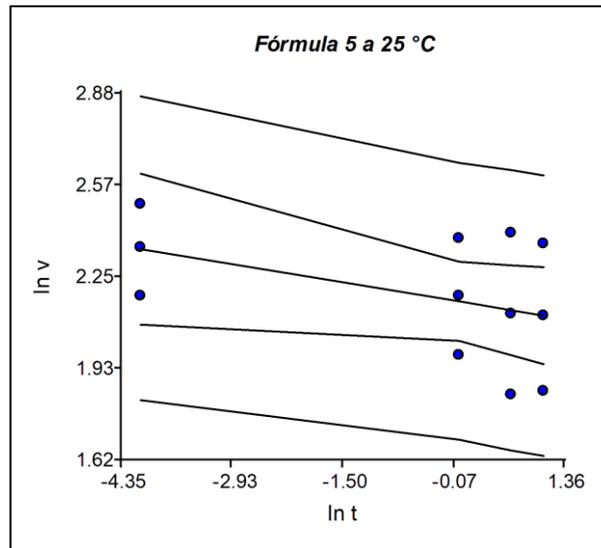
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXVI. **Modelo matemático para la formulación 4 a 25 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
4	$\ln(v) = -0,0618 \ln(t) + 2,7712$	0,1455	0,0678

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 34. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 5 a 25 °C**



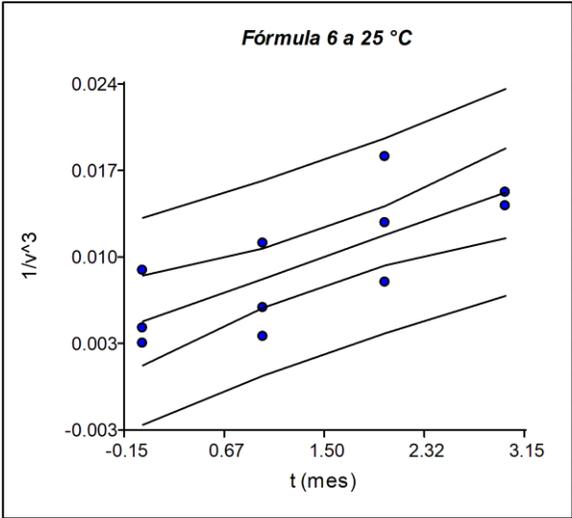
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXVII. **Modelo matemático para la formulación 5 a 25 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
5	$\ln(v) = -0,0444 \ln(t) + 2,1614$	0,1368	0,0637

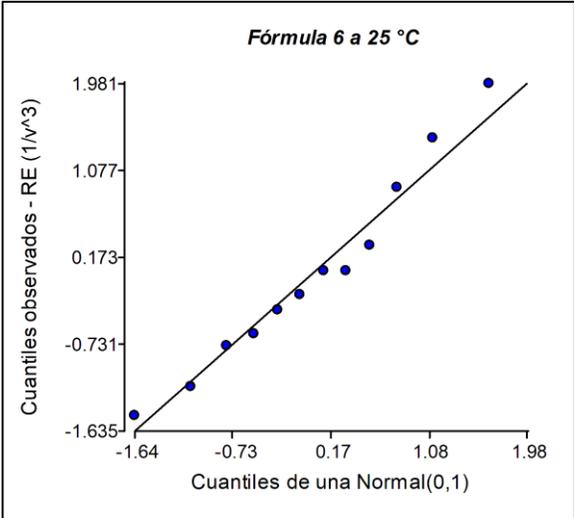
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 35. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 6 a 25 °C**



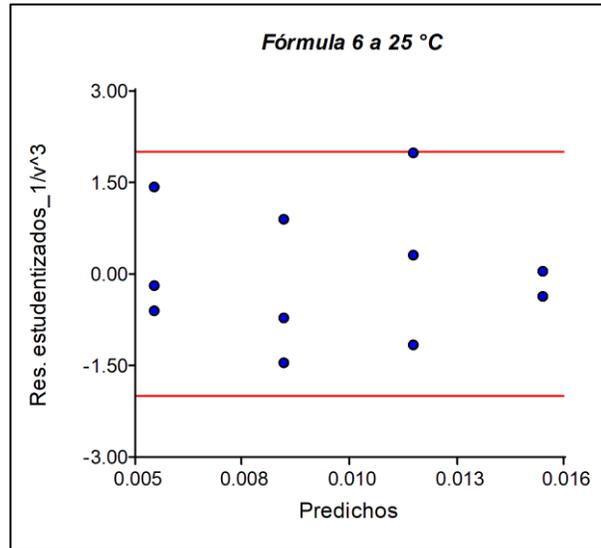
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 36. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 6 a 25 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 37. **Gráfica de residuos para la formulación 6 a 25 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXVIII. **Modelo matemático para la formulación 6 a**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
6	$\frac{1}{v^3} = 0,0034 t + 0,0052$	0,0036	0,0019

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

#### 4.1.3. **Emulsiones de betún líquido en incubación a 40 °C de temperatura**

La Tabla XXIX muestra un resumen de los modelos mejor ajustados para cada formulación. De la misma manera que para las formulaciones a 10 y 25 °C, el criterio utilizado para la aceptación de los mismos fue que tuvieran una probabilidad de contraste debajo de 0,05 y con el  $R^2$  más alto.

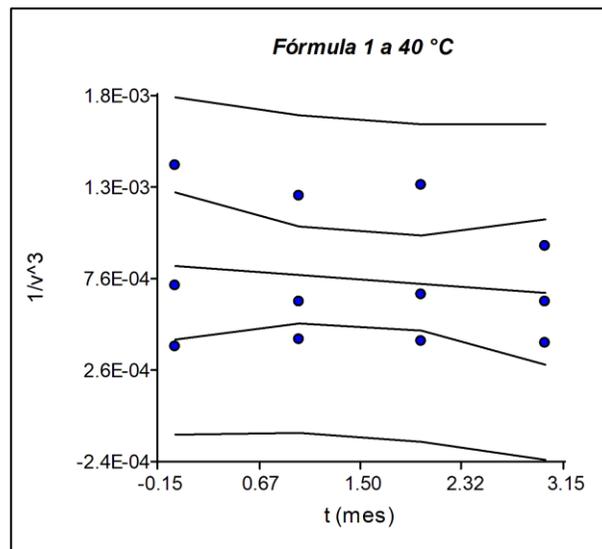
Tabla XXIX. **Resumen de modelos aceptados y sus criterios para cada formulación de betún líquido a 40 °C**

Fórmula	Modelo	R^2	ECMP	AIC	BIC	CpMallows	Bondad de ajuste		Falta de ajuste	
							F	p	F	p
1	$1/v^3=f(t)$	0,0247	2,00E-07	-151,818	-150,364	0,2532	0,2532	0,6257	0,0363	0,9645
2	$\ln(v)=f(\ln(t))$	0,6322	0,0507	-2,3894	-0,9347	17,1918	17,1918	0,002	3,3118	0,0896
3	$\ln(v)=f(1/t^2)$	0,0283	0,0757	1,3132	2,7679	0,2911	0,2911	0,6013	0,0427	0,9584
4	$1/v=f(t)$	0,4245	0,0005	-57,4163	-55,9616	7,3763	7,3763	0,0217	0,2879	0,7573
5	$\ln(v)=f(t)$	0,289	0,0484	-2,4279	-0,9732	4,0649	4,0649	0,0714	0,0466	0,9547
6	$1/v=f(t)$	0,5883	0,0363	-5,5236	-4,0688	14,2902	14,2902	0,0036	0,6983	0,5254

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Las formulaciones con probabilidad mayor a la significancia aceptable. Un 5 %, están de color rojo. Por esta razón no se incluyen sus gráficos de normalidad y de residuos más adelante.

Figura 38. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 1 a 40 °C**



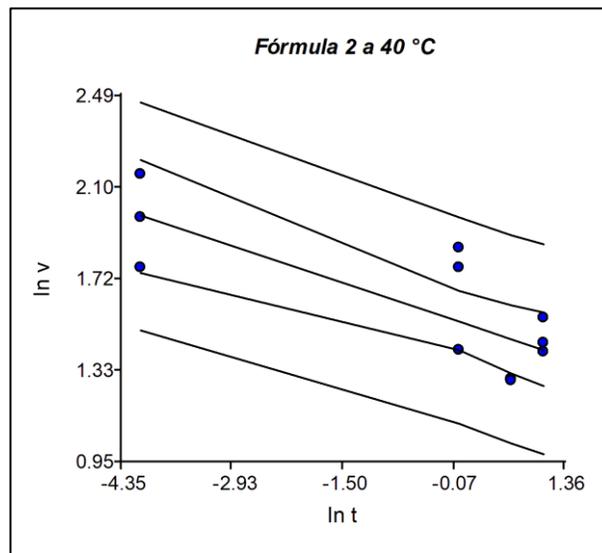
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXX. **Modelo matemático para la formulación 1 a 40 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
1	$\frac{1}{v^3} = -4,80 \times 10^{-05} t + 0,0008$	0,0004	0,0003

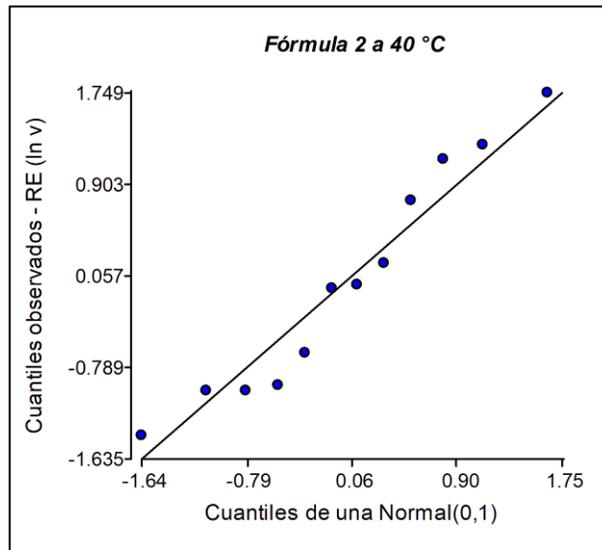
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 39. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 2 a 40 °C**



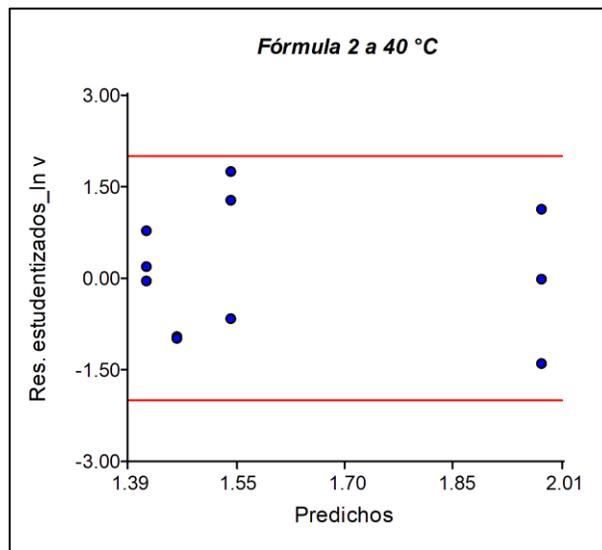
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 40. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 2 a 40 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 41. **Gráfica de residuos para la formulación 2 a 40 °C**



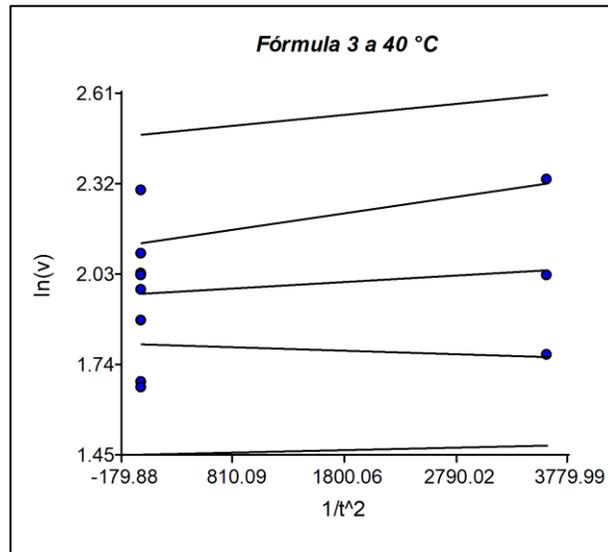
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXXI. **Modelo matemático para la formulación 2 a 40 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
2	$\ln(v) = -0,1081 \ln(t) + 1,5387$	0,1248	0,0581

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 42. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 3 a 40 °C**



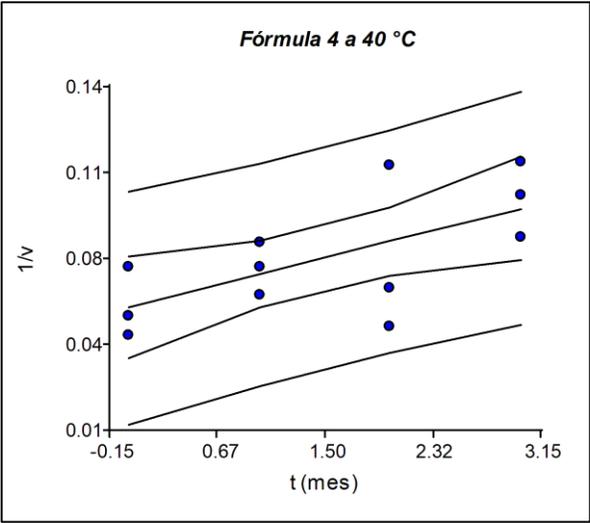
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXXII. **Modelo matemático para la formulación 3 a 40 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
3	$\ln(v) = \frac{2,20 \times 10^{-05}}{t^2} + 1,9678$	0,1620	1,00E-04

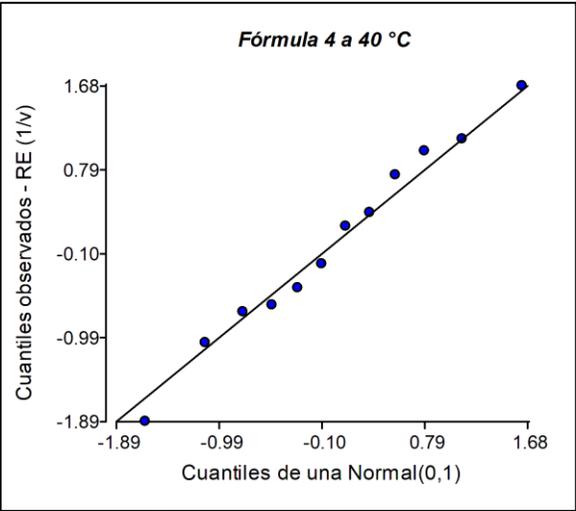
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 43. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 4 a 40 °C**



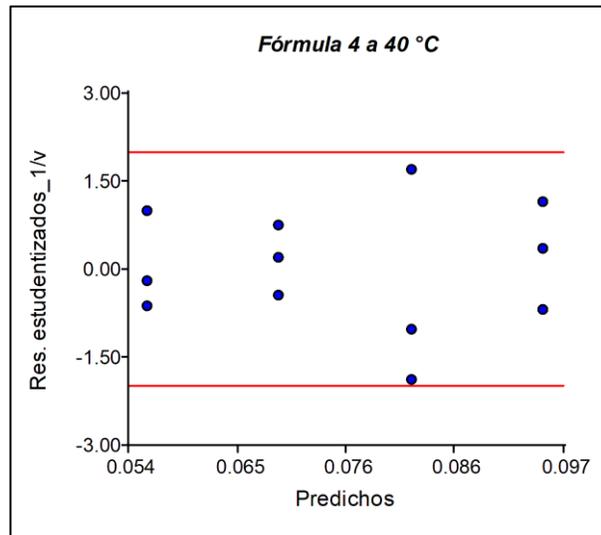
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 44. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 4 a 40 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 45. Gráfica de probabilidad normal para la formulación 4 a 40 °C



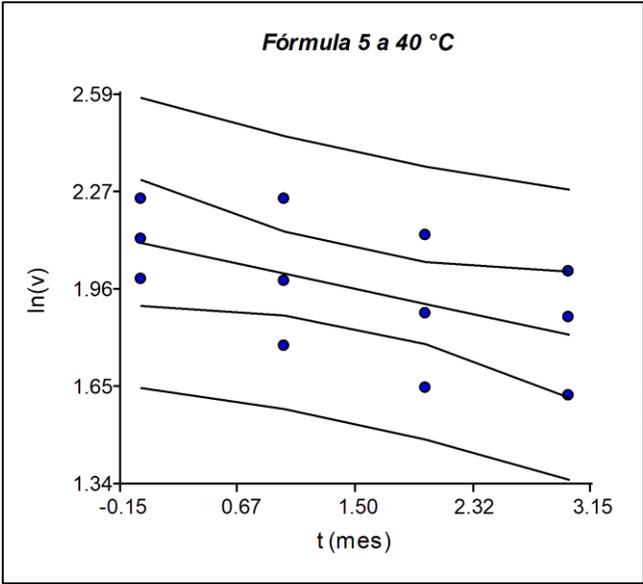
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXXIII. Modelo matemático para la formulación 4 a 40 °C

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
<b>4</b>	$\frac{1}{v} = 0,0132 t + 0,0557$	0,0203	0,0109

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 46. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 5 a 40 °C**



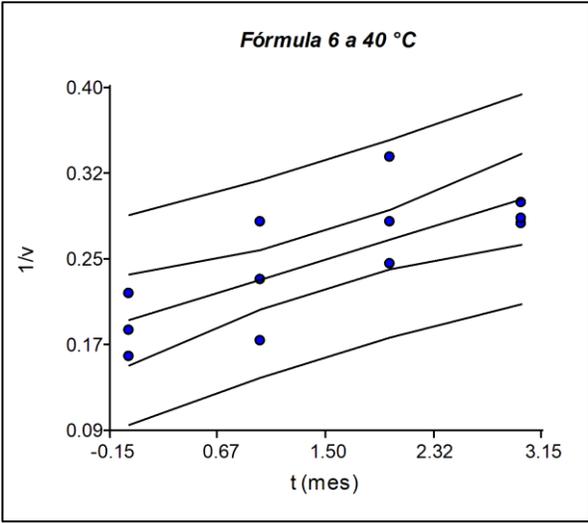
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXXIV. **Modelo matemático para la formulación 5 a 40 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
5	$\ln(v) = -0,0971 t + 2,1101$	0,2008	0,1074

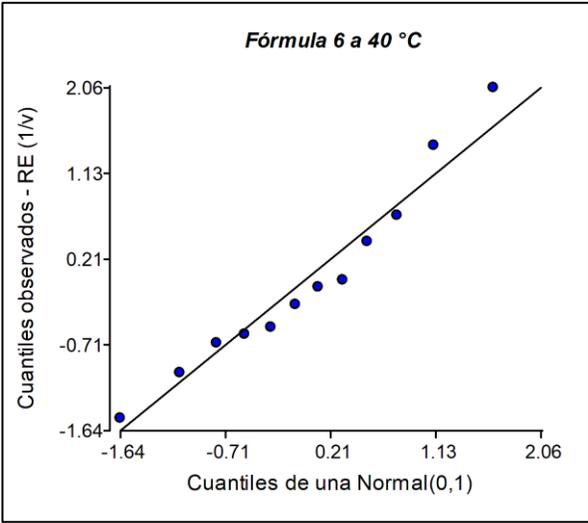
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 47. **Gráfica de viscosidad cinemática en función del tiempo para la formulación 6 a 40 °C**



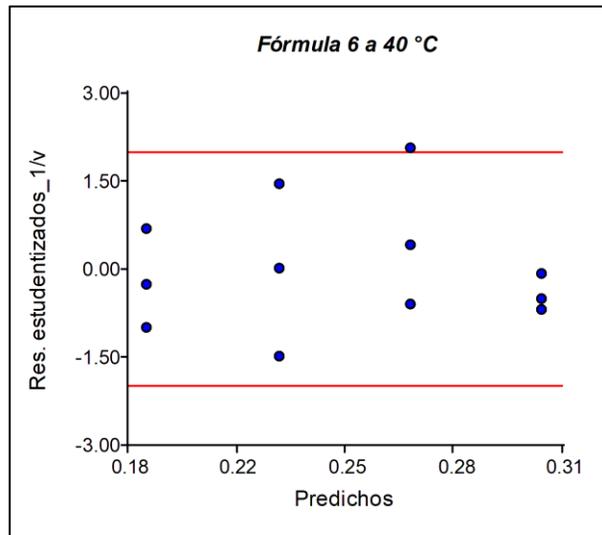
Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 48. **Gráfica de probabilidad normal para la formulación 6 a 40 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Figura 49. **Gráfica de residuos para la formulación 6 a 40 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

Tabla XXXV. **Modelo matemático para la formulación 6 a 40 °C**

Formulación	Modelo	Intervalos de confianza (+/-)	
		Intercepto	Variable
<b>6</b>	$\frac{1}{v} = 0,0368 t + 0,1908$	0,0417	0,0223

Fuente: elaboración propia, empleando InfoStat.

## 4.2. Predicción del tiempo de vida de las diferentes formulaciones de betún líquido a un año

Se despejó la viscosidad cinemática para los modelos matemáticos obtenidos de las seis formulaciones de betún líquido evaluadas, y se sustituyó el tiempo por doce (12 meses = 1 año).

### 4.2.1. Formulaciones a 10 °C de temperatura

Las viscosidades cinemáticas obtenidas en la Tabla XXXVI son una predicción obtenida a partir de los modelos matemáticos. Estas viscosidades a 10 °C representan las emulsiones expuestas a bajas temperaturas y su posible degradación a esta temperatura.

Tabla XXXVI. **Predicción de la viscosidad cinemática a un año para las formulaciones de betún líquido a 10 °C**

#	Modelo despejado	Sustitución	Viscosidad cinemática en un año
1	$v = 14,188 * (1,005)^{1/t}$	$v = 14,188 * (1,005)^{1/12}$	$v = 14,1939 \frac{mPa * cc * s}{g}$
2	$v = 7,35 * (0,86329)^t$	$v = 7,35 * (0,86329)^{12}$	$v = 2,2594 \frac{mPa * cc * s}{g}$
3	$v = \frac{175,439}{t + 15,4561}$	$v = \frac{175,439}{(12) + 15,4561}$	$v = 6,3898 \frac{mPa * cc * s}{g}$
4	$v = \frac{17,8018}{t^{0,0766}}$	$v = \frac{17,8018}{(12)^{0,0766}}$	$v = 14,7163 \frac{mPa * cc * s}{g}$
5	$v = \frac{9,06209}{t^{0,0604}}$	$v = \frac{9,06209}{(12)^{0,0604}}$	$v = 7,7991 \frac{mPa * cc * s}{g}$
6	$v = \frac{36,4964}{t + 5,5073}$	$v = \frac{36,4964}{(12) + 5,5073}$	$v = 2,0846 \frac{mPa * cc * s}{g}$

Fuente: elaboración propia, empleando calculadora Voyage 200.

Luego, se comparó la viscosidad cinemática de las emulsiones de betún en el mes cero (cuando fueron elaboradas), y en el mes doce para definir cuál presenta menor cambio en la viscosidad a esta temperatura.

Tabla XXXVII. **Comparación de viscosidades cinemáticas para las formulaciones de betún líquido a 10 °C**

Formulación	Mes	$\nu$ (mPa*cc*s/g)	$\Delta\nu$ (mPa*cc*s/g)	R <sup>2</sup>
1	0	14,8088	0,6149	0,0273
	12	14,1939		
2	0	7,5959	6,3365	0,5240
	12	1,2594		
3	0	10,9918	4,6020	0,0760
	12	6,3898		
4	0	24,4525	9,7362	0,4898
	12	14,7163		
5	0	11,5239	3,7248	0,3933
	12	7,7991		
6	0	6,6222	4,5376	0,7989
	12	2,0846		

Fuente: elaboración propia.

En este caso las formulaciones 1 y 3 están de color rojo puesto que el R<sup>2</sup> de su regresión es muy bajo, por lo cual sus predicciones no son las mejores en comparación al resto. La formulación que tiene un cambio más pequeño con un R<sup>2</sup> más alto es la elegida.

#### 4.2.2. Formulaciones a 25 °C de temperatura

A esta temperatura se le considera como la muestra de control. Las viscosidades obtenidas, de nuevo son una predicción a un año de cada formulación de betún líquido.

Tabla XXXVIII. **Predicción de la viscosidad cinemática a un año para las formulaciones de betún líquido a 25 °C**

#	Modelo despejado	Sustitución	Viscosidad cinemática en un año
1	$\nu = -0,7943 t + 15,8227$	$\nu = -0,7943(12) + 15,8227$	$\nu = 6,2911 \frac{mPa * cc * s}{g}$
2	$\nu = \frac{5,6593}{t^{0,0888}}$	$\nu = \frac{5,6593}{(12)^{0,0888}}$	$\nu = 4,5387 \frac{mPa * cc * s}{g}$
3	$\nu = 11,2178(0,99999)^{1/t^3}$	$\nu = 11,2178(0,99999)^{1/(12)^3}$	$\nu = 11,2178 \frac{mPa * cc * s}{g}$
4	$\nu = \frac{15,9778}{t^{0,0618}}$	$\nu = \frac{15,9778}{(12)^{0,0618}}$	$\nu = 13,7032 \frac{mPa * cc * s}{g}$
5	$\nu = \frac{8,68329}{t^{0,0444}}$	$\nu = \frac{8,68329}{(12)^{0,0444}}$	$\nu = 7,7762 \frac{mPa * cc * s}{g}$
6	$\nu = \frac{6,65029}{(t + 1,52941)^{1/3}}$	$\nu = \frac{6,65029}{(12 + 1,52941)^{1/3}}$	$\nu = 2,7909 \frac{mPa * cc * s}{g}$

Fuente: elaboración propia, empleando calculadora Voyage 200.

A continuación, se compararon las viscosidades cinemáticas en el mes cero y en el mes doce.

Tabla XXXIX. **Comparación de viscosidades cinemáticas para las formulaciones de betún líquido a 25 °C**

Formulación	Mes	$\nu$ (mPa*cc*s/g)	$\Delta\nu$ (mPa*cc*s/g)	R <sup>2</sup>
1	0	15,5074	9,2163	0,2183
	12	6,2911		
2	0	8,2802	3,7415	0,4954
	12	4,5387		
3	0	9,8713	-1,3465	0,0565
	12	11,2178		
4	0	20,9463	7,2431	0,2926
	12	13,7032		
5	0	10,4697	2,7435	0,1947
	12	7,7262		
6	0	5,8040	3,0131	0,6116
	12	2,7909		

Fuente: elaboración propia.

Se encuentran en rojo para  $\Delta\nu$  las diferencias negativas, ya que no puede haber un aumento en la viscosidad de las emulsiones a un año. Los R<sup>2</sup> de color rojo son los modelos con pobres ajustes y que no cumplen con el nivel de significancia establecido.

#### 4.2.3. Formulaciones a 40 °C de temperatura

A 40 °C es la temperatura de degradación acelerada aplicada a emulsiones, por tanto, esta predicción es la que más nos interesa para la durabilidad de la emulsión durante su tiempo de anaquel.

Tabla XL. **Predicción de la viscosidad cinemática a un año para las formulaciones de betún líquido a 40 °C**

#	Modelo despejado	Sustitución	Viscosidad cinemática en un año
1	$\nu = \frac{-27,5161}{(t - 16,6667)^{1/3}}$	$\nu = \frac{-27,5161}{(12 - 16,6667)^{1/3}}$	$\nu = 16,4658 \frac{mPa * cc * s}{g}$
2	$\nu = \frac{4,65853}{t^{0,1081}}$	$\nu = \frac{4,65853}{(12)^{0,1081}}$	$\nu = 3,5611 \frac{mPa * cc * s}{g}$
3	$\nu = 7,1549 * (1,00002)^{1/t^2}$	$\nu = 7,1549 * (1,00002)^{1/(12)^2}$	$\nu = 7,1549 \frac{mPa * cc * s}{g}$
4	$\nu = \frac{75,7576}{t + 4,2197}$	$\nu = \frac{75,7576}{12 + 4,2197}$	$\nu = 4,6707 \frac{mPa * cc * s}{g}$
5	$\nu = 8,2491 * (0,9075)^t$	$\nu = 8,2491 * (0,9075)^{12}$	$\nu = 2,5737 \frac{mPa * cc * s}{g}$
6	$\nu = \frac{27,1739}{t + 5,18478}$	$\nu = \frac{27,1739}{12 + 5,18478}$	$\nu = 1,5813 \frac{mPa * cc * s}{g}$

Fuente: elaboración propia, empleando calculadora Voyage 200.

En la siguiente tabla se procederá a comparar las viscosidades cinemáticas de las formulaciones desde su inicio.

Tabla XLI. **Comparación de viscosidades cinemáticas para las formulaciones de betún líquido a 40 °C**

Formulación	Mes	$\nu$ (mPa*cc*s/g)	$\Delta\nu$ (mPa*cc*s/g)	R <sup>2</sup>
1	0	11,3063	-5,1595	0,0247
	12	16,4658		
2	0	7,2283	3,6672	0,6322
	12	3,5611		
3	0	7,9456	0,7907	0,0283
	12	7,1549		
4	0	18,4354	13,7647	0,4245
	12	4,6707		
5	0	8,3996	5,8259	0,2890
	12	2,5737		
6	0	5,0293	3,4480	0,5883
	12	1,5813		

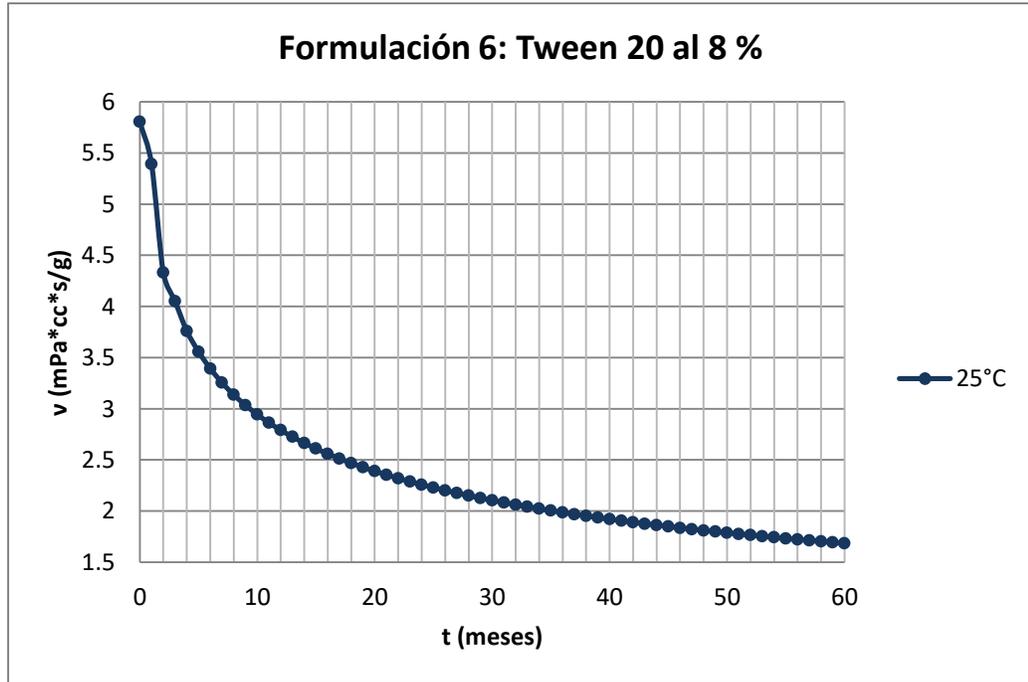
Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Tabla XLI, la formulación 6 es la que menor cambio presenta.

#### 4.3. Proyección de tiempo de vida

Debido a que la formulación 6 demostró ser la que mayor estabilidad presentó a 40 °C, y siendo la que también cumplió estas expectativas para el grupo de control, se eligió como la formulación para usarse en el producto final. A continuación, se caracterizará el posible comportamiento de la viscosidad cinemática del Tween 20 al 8 % en un tiempo a 5 años (60 meses), utilizando el modelo matemático obtenido.

Figura 50. **Gráfico de tendencia de la viscosidad cinemática para la formulación 6 a 25 °C**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel 2010.

Como se observa en la figura 50, la viscosidad cinemática va disminuyendo en función del tiempo.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A través de la metodología establecida fue seleccionado el emulgente que mantiene estable por más tiempo una nueva formulación de betún líquido a determinada concentración. Con dicho emulgente es posible predecir el tiempo de vida en anaquel para un producto hipotético de venta al público.

### 5.1. Caracterización de la viscosidad cinemática a 10 °C

Según la Tabla XV, para las formulaciones 1 y 3 ningún modelo matemático cumplió con el nivel de significancia establecido, esto puede deberse a las fluctuaciones de sus tendencias como se muestra en la Figura 12, donde se observa el comportamiento oscilante de la viscosidad en cada muestreo.

En la Tabla XXXVI se obtuvo el valor que podría tener la viscosidad en un año. A simple vista no se logran apreciar los cambios, por ello en la Tabla XXXVII se comparó la viscosidad cinemática en los meses 0 y 12.

Por efecto de la baja temperatura, las gotas de la fase dispersa tienen menor capacidad de acelerarse para chocar entre sí y coalescer. Esto repercute en un aumento de la viscosidad en todas las formulaciones. Por lo tanto, la viscosidad cinemática de todas las formulaciones no debería variar considerablemente en un año, caso contrario de las formulaciones 2 y 4 que si lo hicieron. Por otra parte, las formulaciones 1 y 3 tienen un ajuste relativamente reducido por lo que sus proyecciones a un año no son representativas. En el caso de las formulaciones 5 y 6 que tienen Tween 20 como emulgente,

demonstraron ser las que menor cambio podrían tener en su viscosidad cinemática a un año. Sin embargo, el modelo de la formulación 6 tiene un valor de correlación  $R^2$  más elevado que la formulación 5, por lo que su proyección de la viscosidad será más confiable. Posiblemente, entonces, las fases oleosa y acuosa de la formulación 6 se mantendrán en emulsión al cabo de un año.

## **5.2. Caracterización de la viscosidad cinemática a 25 °C**

De igual manera que para la temperatura anterior, en la Tabla XXII se muestran los modelos que se eligieron según los criterios ya mencionados para caracterizar las tendencias de las viscosidades cinemáticas del grupo de control en función del tiempo. En este caso el valor de la probabilidad de contraste no es menor al nivel de significancia para las formulaciones 1, 3, 4 y 5. Como se observa en la Figura 11, las fluctuaciones de las tendencias para estas formulaciones tienen ciertas desviaciones posiblemente provocadas por las condiciones climáticas a las cuales se realizó la toma de datos, motivo por el cual no se lograron ajustar de mejor manera los modelos matemáticos a esas tendencias.

En la 0 se comparan las viscosidades del mes 0 con el mes 12 obtenidas a partir de los modelos matemáticos de cada formulación. Este grupo se mantuvo en condiciones normales de temperatura en incubación, donde el efecto de la temperatura sobre la emulsión genera que las gotas tengan más libertad de movimiento y aceleración, debido a la ligera disminución de la viscosidad cinemática comparada con la temperatura anterior, por tanto, la probabilidad de coalición entre gotas es más alta.

Como se observa en la tabla mencionada, la formulación 3 presenta un aumento en la proyección de su viscosidad cinemática a un año por lo que su

diferencia es negativa. Dicho comportamiento no es normal para una emulsión en función del tiempo, por ende, se asumió que el modelo no cumple con los requisitos necesarios para lograr hacer una predicción más aproximada a la real debido a su pobre ajuste. De igual forma, las proyecciones de viscosidad cinemática para las formulaciones 1, 4 y 5 no son tomadas en cuenta debido a su bajo ajuste.

Por otra parte, las formulaciones 2 y 6 que llevan por emulgente al Tween 80 al 12 % y Tween 20 al 8 % respectivamente, son las que probablemente tendrán menor cambio en su viscosidad cinemática al transcurrir un año. Sin embargo, la formulación 6 tiene mejor ajuste de sus datos y menor diferencia de viscosidad en esta temperatura. Posiblemente esta emulsión permanecerá estable al cabo de un año.

### **5.3. Caracterización de la viscosidad cinemática a 40 °C**

En la Tabla XXIX se muestran los modelos que se eligieron según los criterios ya mencionados para caracterizar las tendencias de las viscosidades cinemáticas del grupo expuesto a degradación acelerada. En este caso el valor de probabilidad no es menor al nivel de significancia para las formulaciones 1, 3 y 5. Como se observa en la Figura 13, también se logran apreciar fluctuaciones de estas tendencias, motivo por el cual no se ajustan significativamente a los modelos matemáticos estas formulaciones.

En la Tabla XLI se compararon las viscosidades del mes 0 con el mes 12 obtenidas a partir de los modelos matemáticos de cada formulación. A esta temperatura la viscosidad disminuye, las gotas de la fase dispersa aceleran sus movimientos y tienen más espacio para hacerlo, facilitando la coalescencia y

posible rotura. A su vez, esto puede generar que la proyección de la viscosidad en un año sea suficientemente diferente que en el mes cero.

En el caso de la formulación 1, la viscosidad presentó un aumento en doce meses. Esto pudo deberse al ajuste reducido del modelo matemático que no produce una predicción de la viscosidad confiable, y a la fluctuación de la viscosidad durante el período de incubación. Las formulaciones 3 y 5 también tienen ajustes reducidos por lo que su predicción de viscosidad cinemática no puede ser tomada en cuenta con el resto. La formulación 4 tiene un cambio muy grande en su viscosidad a doce meses. Esto pudo deberse a que la temperatura presenta un efecto significativo en la degradación de la emulsión y podría presentar rotura total en un año.

Las formulaciones 2 y 6 presentan una menor variación en su viscosidad en un año. Sorprendentemente los resultados son similares a los obtenidos en el grupo de control, demostrando ser ambos emulgentes aptos para el producto final ya que presentan buenos ajustes y cambios en la viscosidad similares. Sin embargo, tomando en cuenta que la formulación 6 destacó como emulsión estable a 10 °C y 25 °C, y su concentración Tween 20 al 8 % es menor comparada con el Tween 80 al 12 % en la formulación 2, se eligió a este como el emulgente ideal para el producto final.

Asimismo, analizando los resultados se infiere que las emulsiones con menores magnitudes en la viscosidad presentan mayor estabilidad que las que tenían mayor magnitud. Esto puede deberse a que no se necesitan grandes cantidades de emulgente para lograr mantener las gotas suspendidas. Una vez más, calidad es mejor que cantidad.

En la Figura 50, se muestra lo que podría ser la tendencia de la viscosidad cinemática para formulación 6 a cinco años en condiciones normales. Como se aprecia en el gráfico la viscosidad cinemática empieza a disminuir drásticamente durante los primeros 20 meses y luego comienza a presentar un comportamiento asintótico con el tiempo.

Este comportamiento puede explicarse como: el decaimiento acelerado de la viscosidad cinemática por acción de las condiciones ambientales durante los primeros 20 meses y la eficacia del modelo de predecir dicha tendencia. Luego, una posible rotura de la emulsión lo que podría causar que la viscosidad cinemática de la emulsión dejara de cambiar significativamente en función del tiempo.

Tomando en cuenta la aceptación que tiene el método de estabilidad acelerada para emulsiones, se estima que el tiempo máximo de vida de anaquel de la emulsión sea de aproximadamente dos años a partir de su fabricación.

#### **5.4. Comportamiento cualitativo de las diferentes formulaciones de betún líquido durante y al final del período de incubación**

Como se detalla en la metodología se prepararon nueve formulaciones de betún líquido utilizando Tween 80, Tween 20 y lauril sulfato de sodio como emulgentes. Se tomaron diferentes muestras de cada formulación para ponerlas en incubación a tres diferentes temperaturas: a 10 °C, con el fin de mantener las partículas suspendidas mayor tiempo y observar si las bajas temperaturas repercutían en solidificación en alguno de los componentes; a 25 °C, como el grupo de control; y a 40 °C, con el fin de acelerar la degradación de las emulsiones y observar posibles roturas de la emulsión como la coalescencia.

Al finalizar el periodo de incubación: las seis formulaciones restantes a 10 °C se mantuvieron estables con una ligera capa de crema en la superficie; ninguna de las emulsiones a 25 °C presentó algún mecanismo de ruptura visible; y las emulsiones a 40 °C de incubación se mantuvieron como emulsiones sin ruptura visible, con excepción de las formulaciones 1 y 3 que presentaron separación de aceite de ricino en la superficie en forma de gotas. Sin embargo, este se mezclaba por simple agitación y se mantuvo sin volver a presentar cremado hasta las 48 horas siguientes a temperatura ambiente. Por tanto, cualitativamente se aceptaron los emulgentes Tween 20 y Tween 80 para la nueva formulación de betún líquido.

Sabiendo que el Tween 20 en la formulación 6 es el emulgente ideal para este betún líquido, en la Figura 51 se aprecia el brillo que aporta al calzado la aplicación de dicha formulación.

En la imagen de la izquierda se observa el calzado con falta de brillo, y en la derecha se observa la diferencia al haber aplicado la formulación de betún líquido. Cabe destacar que, durante los meses posteriores a la aplicación de todas las formulaciones de betún líquido a diferentes zapatos, ninguno presentó efectos negativos sobre la piel como rigidez, rajaduras o descascamiento, confirmando la correcta elección y objetivo de los componentes que forman parte de la formulación que son: dar brillo y protección al calzado sin dañarlos a largo plazo.

Figura 51. Calzado antes y después de la aplicación de la formulación 6



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. El agente emulgente que mayor estabilidad brinda a esta formulación de betún líquido para zapatos es el Tween 20 al 8 %.
2. La viscosidad cinemática de la formulación 6 a 10 °C de temperatura de incubación presenta una tendencia inversa en función del tiempo a partir de una transformación lineal.
3. La viscosidad cinemática de la formulación 6 a 25 °C de temperatura de incubación presenta una tendencia polinomial en función del tiempo a partir de una transformación lineal.
4. La viscosidad cinemática de la formulación 6 a 40 °C de temperatura de incubación presenta una tendencia logarítmica en función del tiempo a partir de una transformación lineal.
5. En un año de degradación acelerada para la formulación 6 se estima que podría tener menor diferencia en su viscosidad cinemática que el resto de las formulaciones, por lo que se espera que dicha emulsión permanezca estable durante ese período de tiempo.
6. Se proyecta que el tiempo de vida de anaquel de la emulsión con Tween 20 al 8 % sea de aproximadamente 2 años desde su fabricación.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar mediciones cada semana en lugar de cada mes durante los 90 días de incubación, con el objetivo de obtener datos que describan de mejor forma el comportamiento de la viscosidad cinemática durante el estudio de estabilidad acelerada y de esta manera obtener predicciones más precisas.
2. Para realizar un análisis más profundo de las interacciones de las fases dispersa y continua, se podría dar seguimiento a las emulsiones tomando micrografías para definir el tamaño de las gotas al inicio y al final del estudio de estabilidad acelerada, y ser comparadas con la viscosidad cinemática para definir la cinética de coalescencia entre gotas.
3. Realizar una mezcla de dos o más emulgentes para obtener emulsiones más estables basándose en la escala HLB.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Acofarma. *Tween*. [en línea]. <<https://www.cofgranada.com/ufc/documentos/modulos/TWEEN%2080.pdf>>. [Consulta: 3 de mayo de 2019].
2. ALMODÓVAR, Yesenia; HERNÁNDEZ, Alina. *Evaluación del comportamiento del estearato de trietanolamina y alcohol cetílico en emulsiones cosméticas*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2013. 90 p.
3. ARANBERRI, Ibon; BINKS, Bernard. *Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos*. [en línea]. <[https://www.researchgate.net/publication/255671706\\_ELABORACION\\_Y\\_CARACTERIZACION\\_DE\\_EMULSIONES\\_ESTABILIZADAS\\_POR\\_POLIMEROS\\_Y\\_AGENTES\\_TENSIOACTIVOS](https://www.researchgate.net/publication/255671706_ELABORACION_Y_CARACTERIZACION_DE_EMULSIONES_ESTABILIZADAS_POR_POLIMEROS_Y_AGENTES_TENSIOACTIVOS)>. [Consulta: 19 de mayo de 2019].
4. BabyCenter. *¿Debo preocuparme? El lauril sulfato de sodio*. [en línea]. <<https://espanol.babycenter.com/a14700052/debo-preocuparme-el-lauril-sulfato-de-sodio-sls>>. [Consulta: 25 de mayo de 2019].
5. BOYD, John.; PARKINSON, Christian; SHERMAN, Peter. *Factors affecting emulsion stability, and the HLB concept*. 42a. ed. Welwyn, Hertfordshire, England: Unilever research laboratory Colworth/Welwyn, 1971. 397 p.

6. Cailà & Pares. *Ácido esteárico*. [en línea]. <<https://cailapares.com/acido-estearico/>>. [Consulta: 25 de mayo de 2019].
7. CASTRO, German; GUEVARA, Alirio; MÉNDEZ, Raúl; GALINDO, Hugo. *Comportamiento reológico de un aroma emulsificado*. [en línea]. <<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/556>>. [Consulta: 25 de mayo de 2019].
8. Curiosoando.com. *¿Qué es un surfactante o tensioactivo aniónico?* [en línea]. <<https://curiosoando.com/surfactante-o-tensioactivo-anionic/>>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].
9. Ecured. *Glicerol*. [en línea]. <<https://www.ecured.cu/Glicerol>>. [Consulta: 3 de mayo de 2019].
10. FERNÁNDEZ, Alejandro. *Preparación, caracterización y estabilidad de emulsiones y microemulsiones O/W*. España: Universidad de Granada, 2006. 443 p.
11. FERNÁNDEZ, Mercedes. *Emulsiones. Módulo III, sección V*. [en línea]. <<https://docplayer.es/8494472-Modulo-iii-seccion-v-emulsiones-mercedes-fernandez-arevalo.html>>. [Consulta: 3 de mayo de 2019].
12. FERRÉ, Pedro. *Las emulsiones de betún su química-física*. [en línea]. <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1159887>>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].

13. FOGLER, Scott. *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2008. 1088 p.
14. GODOY, Mónica; SALINAS, Duby; VELASCO, Ana. *Determinación del balance hidrófilo-lipófilo (HLB) requerido de grasas y aceites de origen vegetal y animal, para su utilización en las formulaciones farmacéuticas y cosméticas*. El Salvador: Universidad de El Salvador, 2004. 134 p.
15. Instituto de Tecnología de Karlsruhe. *Stabilization of emulsions by OSA starches*. [en línea]. <[https://www.researchgate.net/publication/229353357\\_Stabilization\\_of\\_emulsions\\_by\\_OSA\\_starch](https://www.researchgate.net/publication/229353357_Stabilization_of_emulsions_by_OSA_starch)>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].
16. Jabonarium. *Cera blanca de abejas*. [en línea]. <<https://www.jabonariumshop.com/cera-blanca-de-abejas>>. [Consulta: 19 de mayo de 2019].
17. KHR, Khristov; SD, Taylor; CZARNECKI, James; MASLIYAH, Julie. *Thin liquid film technique – application to water-oil-water bitumen emulsion films*. [en línea]. <[https://www.academia.edu/18349823/Thin\\_liquid\\_film\\_technique\\_application\\_to\\_water\\_oil\\_water\\_bitumen\\_emulsion\\_films](https://www.academia.edu/18349823/Thin_liquid_film_technique_application_to_water_oil_water_bitumen_emulsion_films)>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].
18. LEMUS, Paola. *Análisis comparativo de estabilidad acelerada y estabilidad a largo plazo de jarabe de ambroxol en dos diferentes concentraciones, adultos y niños*. Trabajo de graduación de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 47 p.

19. LEVINE, Ira. *Principios de Fisicoquímica*. 6a ed. México: McGraw-Hill. 2009. 561 p.
20. MÁRQUEZ, Andrés; PALAZOLO, Gonzalo; WAGNER, Jorge. *Emulsiones tipo crema a base de leche de soja 1: Estudios de estabilidad y determinación de las formulaciones*. Argentina: Universidad Nacional de La Plata, 2005. 66 p.
21. MARTÍNEZ, Alejandra; MARTÍN, Nazario; GÓMEZ, Armando; PÁEZ, Antonio. *Betunes asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente*. Madrid, España: Anales de la Real Sociedad Española de Química, 2008. 52 p.
22. MARTÍNEZ, María. *Formación y caracterización de emulsiones altamente concentradas de betún en agua*. España: Universitat de Barcelona, 2014. 180 p.
23. Minitab. ¿Qué es ANOVA? [en línea]. <<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].
24. MORALES, Moisés. *Evaluación de las propiedades de candelilla y carnauba para su aplicación en emulsiones ceras de uso comercial*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2015. 86 p.
25. MORELL, Pere. *Empleo de distintos estabilizantes y procedimientos para mejorar la estabilidad y vida útil de mayonesas*. [en línea]. <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27980/tesinamaster>>

- peremorellesteve.pdf?sequence=1>. [Consulta: 25 de mayo de 2019].
26. MUÑOZ, José; ALFARO, María del Carmen; ZAPATA, Isabel. *Avances en la formulación de emulsiones*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, 2007. 10 p.
  27. PAZMIÑO, Jhonathan. *Modelo lineal mixto para la estimación de la vida útil de productos farmacéuticos en un estudio de estabilidad acelerado*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016. 76 p.
  28. PERRÉ, Patrick. *Estudio detallado de un modelo de transferencia de calor y masa durante el secado por convección de medios porosos*. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931088900841>>. [Consulta: 19 de mayo de 2019].
  29. Quiminet. *Usos y aplicaciones de la trietanolamina*. [en línea]. <<https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-de-la-trietanolamina-4147154.htm>>. [Consulta: 3 de mayo de 2019].
  30. \_\_\_\_\_. *Todo lo que quería saber de la cera de carnauba* [en línea]. <<https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-de-la-cera-de-carnauba-57200.htm>>. [Consulta: 3 de mayo de 2019].
  31. RODRÍGUEZ, Héctor; FALCÓN, José; HERNÁNDEZ, Carlos; CAMPOS, Melek. *Estabilidad de emulsiones acuosas de petróleo crudo pesado con agente emulsionante de productos de pirólisis*. [en

- línea]. <[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2224-61852013000300008&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852013000300008&lng=es&nrm=iso)>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].
32. ROWE, Raymond; SHESKEY, Paul; OWEN, Siân. *Handbook of pharmaceutical excipients*. London: Pharmaceutical Press, 2009. 889 p.
  33. TAMBE, David; SHARMA, Mukul. *Factors controlling the stability of colloid-stabilized emulsions*. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979783711823>>. [Consulta: 11 de mayo de 2019].
  34. US ROJAS, Jennifer. *Estudio de estabilidad acelerada en lotes piloto de un gel exfoliante elaborado a base de cáscara de huevo por medio de la cuantificación de calcio disuelto*. Trabajo de Graduación de Química Farmacéutica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 61 p.
  35. VALLADARES, Shirley. *Estabilidad de emulsiones relacionada con el proceso de deshidratación de crudos*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes, 2005. 134 p.

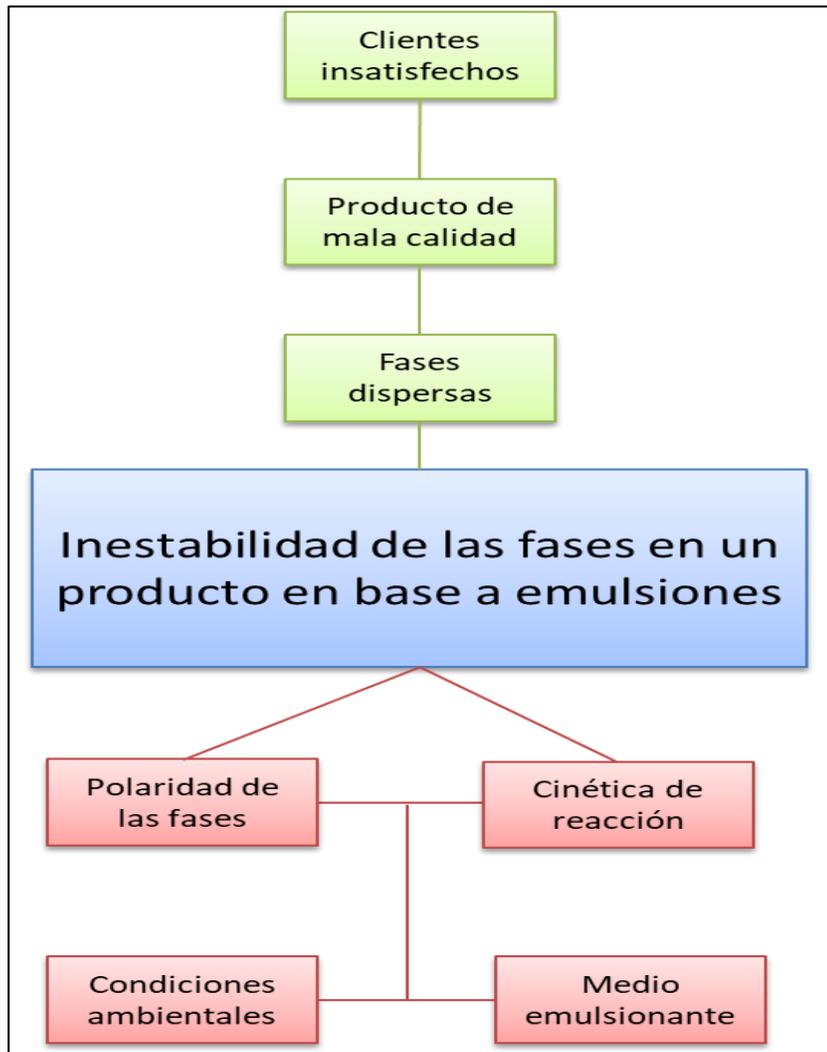
## APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

1er paso	2do paso	3er paso	4to paso	5to paso	6to paso
Carrera	Área	Tema genérico	Tema específico	Especificación	Problema a resolver
<b>Ingeniería Química</b>	Química	Análisis cualitativo	Equilibrio heterogéneo	Preparación de soluciones y polaridades	Formulación de betún líquido para zapatos y selección del emulgente que mantenga estable por mayor tiempo la emulsión.
	Química	Análisis cuantitativo	Solubilidad	Solubilidades en líquidos	
	Complementaria	Estadística 1	Variables aleatorias discretas unidimensionales	Distribución Normal	
	Fisicoquímica	Fisicoquímica 2	Cinética química	Análisis de resultados cinéticos	
	Fisicoquímica	Cinética de procesos químicos	Ley de velocidad de reacciones y procesos	Modelos de velocidad	
	Complementaria	Operaciones y procesos en la industria farmacéutica	Pre formulación de productos	Pre formulación y formulación final de una emulsión	

Fuente: elaboración propia, empleando el programa académico de estudios.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.