



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Modelo experimental de fluidos de  
alta viscosidad con reologías  
no-newtonianas**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Lucero Antuna Herrera

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José Enrique Guzmán Vázquez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Jurado Asignado**

Presidente: **Dr. Alejandro Rodríguez Valdés**  
Secretario: **Dr. William Vicente y Rodríguez**  
Suplente 1: **Dr. Marco Antonio Reyes Huesca**  
Suplente 2: **M.I. Carlos Echeverría Arjonilla**  
Vocal: **Dr. Enrique Guzmán Vázquez**

*A mis pilares de vida les debo todo lo que soy  
el esfuerzo, dedicación y amor que tenemos como familia  
han sido y serán la clave para cualquier proyecto de vida.*

*A mi madre,  
por enseñarme que no hay límites para  
cumplir tus sueños si tienes constancia,  
seguridad y fuerza los puedes realizar*

*A mi padre,  
mi apoyo y consejero, siempre sabes que decir  
hemos aprendido que la calma puede terminar  
con cualquier dificultad*

*A mi hermano,  
eres el mejor ejemplo de honor, responsabilidad y amor  
el que siempre tiene una sonrisa y una buena carcajada  
que me hace recordar lo maravilloso de ser tu hermana.*



## Agradecimientos

Agradezco a mi familia, amigos, compañeros y a mis profesores de ingeniería mecánica, la carrera que me apasiona y fascina cada vez más cuando descubro nuevas y mejores aplicaciones para hacer de este mundo un lugar mejor.

A mi familia por compartir conmigo cada momento de alegría, confusión, desesperación y lo que conlleva esta parte de la vida estudiantil. No encuentro palabras que describan el amor que profeso hacia ustedes.

A mis amigos y amigas, que me aconsejaron a veces hasta me regañaron por tratar de hacerme ver cuánto me hacia falta poner una dirección a mi vida. A mis amigas Katia, Karen y Teresita del niño Jesús, que cada una de ustedes llegó a mi vida en etapas diferentes han sido de lo mejor sin importar que tantas diferencias podamos tener.

A mis compañeros durante la carrera y mis compañeros de CIPIA, por su apoyo que me brindaron, y las tardes de juego de mesa que hacían que mis experimentos no me parecieran eternos.

Al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de afiliarme a su programa de estudiantes y facilitar la elaboración de este trabajo en sus instalaciones.

Dr. Enrique Guzmán Vázquez le agradezco su amabilidad, atención y profesionalismo, este trabajo mejoró su calidad por sus comentarios y orientación pues con las juntas que tuvimos bastaron para comunicar lo que se pretendía.

M.I. Carlos Echeverría Arjonilla desde que nos conocimos me enseñaste que puedes tener la pasión por tu labor y sencillez para hablar con tus compañeros. Además respeto tu trabajo y compromiso que tuviste conmigo.

Dr. Marco Antonio Reyes Huesca desde la clase de elementos de mecánica de medio continuo me di cuenta que el área de termofluidos tendría mi curiosidad puesta en los detalles. Le agradezco por aceptar ser parte de los sinodales, darme tiempo de explicarme y mostrarme los equipos del IIM.

# Resumen

Esta tesis condensa los resultados experimentales para determinar el comportamiento de la viscosidad dinámica para diluciones de glicerina con agua desde 50 %wt hasta 100 %wt de glicerina con un aumento de 10 %wt entre cada dilución, dentro de un intervalo de temperatura de 20 °C hasta 60 °C obteniendo así una base de datos para comparar con referencias citadas y realizar la discusión de sus variaciones.

El objetivo del presente trabajo es el de aportar una expresión que permita estimar confiablemente la viscosidad de fluidos de alta viscosidad para diferentes aplicaciones. Una de las más obvias es la que se refiere a los flujos multifásicos que se investigan en laboratorios especializados, como el que tiene el Instituto de Ingeniería que busca simular condiciones de transporte de flujos multifásicos utilizando mezclas de glicerina con aire. Este proyecto tiene hasta este momento líneas de investigación para flujo horizontal y vertical con flujos bifásicos y trifásicos, teniendo como objetivo principal evaluar el desempeño de un mejorador de flujo para la reducción de la caída de presión en tuberías horizontales.

El procedimiento y la metodología aplicada para realizar los experimentos han sido los principales factores por los que las mediciones fueron afectadas, en particular el tipo de calentamiento para las mezclas debido a el ajuste del equipo disponible. Este tipo de observaciones son los que pueden ayudar al laboratorista cuando realiza un análisis de sus datos, pues se debe tomar en cuenta el entorno donde se realiza cualquier tipo de proceso.

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>iv</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Importancia de los crudos pesados y extra-pesados . . . . .	1
1.1.1. Panorama nacional . . . . .	6
1.2. Antecedentes . . . . .	13
1.2.1. Importancia de fluidos modelo en la industria . . . . .	15
1.3. Objetivos de la tesis . . . . .	18
1.3.1. Alcances . . . . .	18
1.3.2. Hipótesis . . . . .	18
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1. Propiedades de transporte de fluidos . . . . .	19
2.1.1. Teoría molecular de la viscosidad de líquidos . . . . .	20
2.1.2. Ley de Newton de la viscosidad . . . . .	22
2.1.3. Fluidos no Newtonianos . . . . .	25

<i>CONTENIDO</i>	VI
2.2. Modelo de viscosidad con dependencia de temperatura . . . . .	28
2.3. Conductividad térmica de emulsión binaria . . . . .	29
2.4. Métodos para medición de viscosidad . . . . .	31
<b>3. EXPERIMENTOS</b>	<b>38</b>
3.1. Aparato experimental . . . . .	38
3.2. Matriz de experimentos . . . . .	44
3.3. Propuesta de metodología de medición . . . . .	44
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>49</b>
4.1. Análisis de incertidumbre . . . . .	49
4.2. Comparación con otros datos reportados . . . . .	55
4.3. Validación de datos experimentales con modelo de viscosidad . . . . .	57
4.4. Conductividad térmica de la emulsión binaria . . . . .	60
4.5. Propuesta de Modificación del Modelo de Nian-Sheng . . . . .	62
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
5.1. Resumen . . . . .	65
5.2. Contribuciones . . . . .	66
5.3. Recomendaciones y trabajo futuro . . . . .	66
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>66</b>
<b>A. ESTUDIO ÓPTICO DEL IINGEN</b>	<b>69</b>

<i>CONTENIDO</i>	VII
<b>B. DATOS</b>	<b>90</b>
B.1. Conductividad térmica para mezclas de líquidos . . . . .	90

# Lista de Figuras

1.1. Densidad contra viscosidad (Journal of Petroleum Science and Engineering).	2
1.2. Cuencas antepaís (Imagen tomada a partir de <a href="http://www.usuarios.geofisica.unam.mx">www.usuarios.geofisica.unam.mx</a> )	5
1.3. Clasificación de los recursos y reservas de hidrocarburos (no a escala). Adaptado de Petroleum Resources Management System, Society of Petroleum Engineers, 2007.(Imagen tomada a partir de Pemex (2017)). . . . .	7
1.4. Carl Wilhelm Scheele . . . . .	13
1.5. Las mejores correlaciones para predecir la viscosidad del aceite crudo contra la temperatura en comparación con los datos experimentales para el aceite 4 (densidad API del aceite de 12,0) (Gráfica tomada a partir de de la Cruz et al. (2013)) . . . . .	16
1.6. La viscosidad predicha del petróleo crudo contra la temperatura en comparación con los datos experimentales para el aceite 4 (densidad API del aceite de 12,0) (Gráfica tomada a partir de de la Cruz et al. (2013)) . . . . .	17
1.7. Las mejores correlaciones para predecir la viscosidad del aceite crudo contra la temperatura en comparación con los datos experimentales para el aceite 1 (densidad API del aceite de 11.5). (Gráfica tomada a partir de de la Cruz et al. (2013)) . . . . .	17
2.1. Ilustración de proceso de escape en el flujo de un líquido. (Imagen tomada a partir de Bird et al. (2004) capítulo 1.5). . . . .	20

2.2. Formación de perfil de velocidad en estado estacionario para un fluido contenido entre dos láminas (Imagen tomada a partir de Bird et al. (2004)) . . . . .	23
2.3. Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos (Imagen tomada a partir de Bird et al. (2004)) . . . . .	26
2.4. Viscosímetro de tubo capilar (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006))	31
2.5. viscosímetro de Ostwald (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006)) .	32
2.6. Diagrama de viscosímetro Ubbelohde (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006)) . . . . .	33
2.7. Esquema de los componentes de un viscosímetro rotatorio de cilindros concéntricos (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006)) . . . . .	34
2.8. Flujo de Couette en un viscosímetro de cilindros concéntricos (Imagen tomada a partir de Barnes et al. (1989)) . . . . .	35
2.9. Representación de un viscosímetro de placas paralelas (Imagen tomada a partir de Barnes et al. (1989)) . . . . .	36
2.10. Representación de forma exagerada de un viscosímetro de cono-placa (Imagen tomada a partir de Barnes et al. (1989)) . . . . .	37
3.1. Componentes Brookfield Viscosimeter DV2T: Viscosímetro Brookfield DV2T, kit de agujas de medición (Imagen tomada a partir de Brookfield DV2T Manual No. M13-167-B0614 BRO (n.d.a)) . . . . .	39
3.2. Componentes Brookfield Viscosimeter DV2T: Termopar y clip (Imagen tomada a partir de Brookfield DV2T Manual No. M13-167-B0614 BRO (n.d.a)) .	40
3.3. Componentes Brookfield Viscosimeter DV2T: Adaptador UL (Imagen tomada a partir de Brookfield Enhanced UL Adapter Assembly & Operating Instruction BRO (n.d.b)) . . . . .	40
3.4. Parrilla Thermo Scientific SuperNuova+ Ceramic Digital (Imagen tomada a partir de ML MCQUEEN Laboratory Supply Supply (n.d.)) . . . . .	41

3.5. Fotografía del viscosímetro Brookfield DV2T . . . . .	41
3.6. Fotografía de aguja del adaptador UL Brookfield . . . . .	42
3.7. Fotografía de ensamble del adaptador UL Brookfield para realizar prueba de viscosidad, el adaptador se encuentra sumergido en agua que proporciona el baño térmico requerido . . . . .	42
3.8. Fotografía de prueba con aguja# 61 para glicerina pura en viscosímetro Brookfield DV2T . . . . .	43
3.9. Acecamiento de fotografía de prueba con aguja# 61 para glicerina pura en viscosímetro Brookfield DV2T . . . . .	43
4.1. 50 %wt . . . . .	52
4.2. 60 %wt . . . . .	52
4.3. 70 %wt . . . . .	53
4.4. 80 %wt . . . . .	53
4.5. 90 %wt . . . . .	54
4.6. Comparación de resultados experimentales con valores reportados por Segur & Oberstar (1951). . . . .	56
4.7. Comparación de resultados experimentales para 50 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951). . . . .	57
4.8. Comparación de resultados experimentales para 60 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951). . . . .	58
4.9. Comparación de resultados experimentales para 70 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951). . . . .	58



4.10. Comparación de resultados experimentales para 80 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951). . . . .	59
4.11. Comparación de resultados experimentales para 90 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951). . . . .	59
4.12. Comparación de resultados experimentales para 100 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951). . . . .	60
4.13. Conductividad térmica de diluciones glicerina con agua, los datos con línea discontinua se calcularon con la ecuación de Filippov mientras que los datos de línea continua corresponde a datos reportados por Segur & Oberstar (1951). . . . .	61
4.14. Comparación de porcentaje de error experimental con datos calculados con la ecuación de Nian-Sheng con modificación de temperatura. . . . .	63
4.15. Comparación de resultados experimentales con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951) con modificación de temperatura. . . . .	64

# Lista de Tablas

1.1. Bitumen y petróleo pesado a nivel mundial (fuente: Journal of Petroleum Science and Engineering Hein (2017)) . . . . .	2
1.2. Clasificación de crudos (Gráfica tomada a partir de Guerrero N. Suárez G., Universidad Nacional de Santander, 2005) . . . . .	3
1.3. Composición de las reservas por activo de la Región Noroeste.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017)) . . . . .	8
1.4. Composición de las reservas por activo de la Región Suroeste.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017)) . . . . .	9
1.5. Composición de las reservas por activo de la Región Norte.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017)) . . . . .	11
1.6. Composición de las reservas por activo de la Región Sur.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017)) . . . . .	12
1.7. Algunas propiedades de glicerina (Tabla modificada a partir de Mota et al. (2017)) . . . . .	14
3.1. Matriz de experimentos, dentro de algunas casillas se encuentra la etiqueta de las gráficas correspondientes. . . . .	44

# Nomenclatura

## Variables

Área:	$A$	Presión:	$p$
Elemento de área:	$a$	Calor específico:	$q$
Rapidez local del sonido:	$c$	Constante de los gases:	$R$
Capacidad calorífica:	$c$	Cte. Univ. de los gases:	$R_u$
Constante arbitraria:	$cte.$	Entropía:	$S$
Energía:	$E$	Radio característico:	$R$
Energía específica:	$e$	Temperatura:	$T$
Campo vectorial:	$\mathbf{F}$	Tiempo:	$t$
Fuerza/volumen:	$\mathbf{f}$	Velocidad:	$v$
Aceleración gravitatoria:	$\mathbf{g}$	Volumen:	$V$
Entalpía:	$H$	Diámetro característico:	$D$
Par de fuerzas:	$M$	Radio característico:	$R$
Energía libre de activación:	$\Delta G_o^+$	Coordenada axial:	$x$
Constante de Boltzmann:	$k$	Vector de posición:	$\mathbf{x}$
Constante de Planck:	$h$	Coordenada transversal:	$z$
Número de Avogadro:	$\tilde{N}$		
Longitud:	$l$		
Masa:	$m$		
Especies químicas:	$N$		
Vector normal:	$\hat{\mathbf{n}}$		

**Letras griegas**

Viscosidad dinámica:	$\mu$	Viscosidad cinemática:	$\nu$
Densidad:	$\rho$	Esfuerzo cortante:	$\tau$
Velocidad de deformación:	$\dot{\gamma}$	Parámetros ajustables:	$\varphi, \alpha$
Velocidad de giro	$\Omega$	Conductividad térmica:	$\lambda$

**Subíndices y superíndices**

Agua:	$w$	Glicerina:	$g$
Emulsión binaria:	$m$		

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

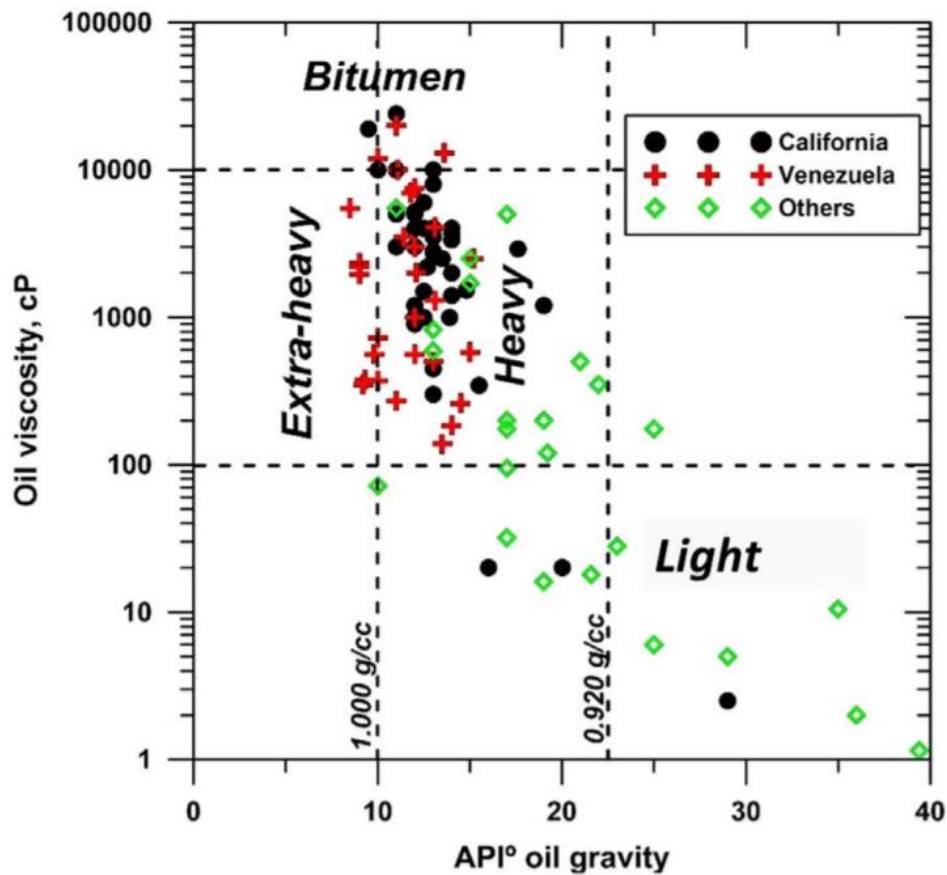
### 1.1. Importancia de los crudos pesados y extra-pesados

A nivel mundial se estima que hay  $5.6 \times 10^{18}$  de barriles de bitumen y petróleo pesado que se producen en más de 70 países, con la mayor parte de petróleo pesado en Venezuela y de bitumen en Canadá. Se estima que aproximadamente un 70 % del bitumen y petróleo pesado se encuentran en Venezuela, Canadá y U.S.A. Otras áreas importantes donde se producen bitumen y petróleo pesado están en el Medio Oriente (16.29 % de petróleo pesado), Asia (principalmente China con 11.86 % de bitumen), África (11.91 % bitumen) y Rusia (9.34 % bitumen) 1.1. El petróleo pesado y el bitumen se distinguen entre sí del petróleo ligero convencional por su gravedad específica y viscosidad, en condiciones normales, el yacimiento se encuentra a una temperatura suficientemente elevada, de modo que los hidrocarburos fluyen hacia el pozo con relativa facilidad bajo la acción de la presión natural del yacimiento. No obstante, en los casos más severos (como en el de los bituminosos), es necesario recurrir a técnicas que estimulan la producción; por ejemplo, las que se basan en la inyección de vapor y agentes químicos (disolventes).

El petróleo pesado se caracteriza por tener gravedades específicas menores a 22.3 °API. Los petróleos cuyos °API están por debajo de 10 °API se clasifican como extrapesados, ultrapesados o superpesados debido a que son más densos que el agua, Fig.1.1.

**Tabla 1.1:** Bitumen y petróleo pesado a nivel mundial (fuente: Journal of Petroleum Science and Engineering Hein (2017))

Region	Heavy Oil (%)	Bitumen (%)	Total (%)
Africa	1.5	11.91	5.97
Asia	6.17	11.86	8.61
Canada (Alberta)	0.565	45.71	19.94
Europe	1.02	0.055	0.606
Middle East	16.29	0	9.29
Russia	2.79	9.34	5.6
Venezuela	55.35	0.027	31.6
U.S.A Total	16.32	21.11	18.37
<b>Grand Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>99.99</b>



**Figura 1.1:** Densidad contra viscosidad (Journal of Petroleum Science and Engineering).

**Tabla 1.2:** Clasificación de crudos (Gráfica tomada a partir de Guerrero N. Suárez G., Universidad Nacional de Santander, 2005)

Tipo de crudo	Rango(°API)
Condensados	42.0 <en adelante
Livianos	30.0 <°API< 41.9
Medianos	22.0 <°API< 29.9
Pesados	10.0 <°API< 21.9
Extrapesados	Por debajo< 9.9

La viscosidad de los crudos ligeros puede oscilar entre 1 centipoise (cP) [0.001 Pa.s] (similar al agua), y aproximadamente 10 cP [0.01 Pa.s]. Por otro lado la viscosidad de los petróleos pesados y extrapesados pueden tener valores comprendidos entre los 20 y los 1,000,000 cP. Los bituminosos suelen tener viscosidades superiores a los 10,000 cP, y pueden llegar a ser más densos que el agua.

Una de las complejidades de los petróleos pesados y bituminosos radica en la dificultad de producirlos y refinar, ya que poseen altas concentraciones de metales y otros elementos que modifican su reología. Entre los elementos que mayor importancia tienen en la composición se encuentran las parafinas y los asfaltenos. Sin embargo, hay muchos otros hidrocarburos, como los saturados y los aromáticos que también afectan las propiedades de flujo de los crudos. lo cual exige más esfuerzos e inversión para la refinación.

Con la gran demanda y la declinación de la producción de muchos de los yacimientos de petróleo convencionales, la atención de la industria en muchos lugares del mundo comienzan a desplazarse hacia la explotación de petróleo pesado.

Aunque la densidad del petróleo es importante para evaluar el valor del recurso y estimar el rendimiento y los costos de refinación, la propiedad del fluido que más afecta la producción y la recuperación es la viscosidad del petróleo, pues cuanto más viscoso es más difícil resulta producirlo.

A pesar de que el petróleo pesado posee un valor intrínseco menor al del petróleo ligero, en países como México se ven confrontadas con la necesidad de comprometer recursos para producirlo.

## Formación de recursos vastos

El petróleo pesado y los recursos bituminosos son en gran parte el resultado de la degradación natural de las acumulaciones de petróleo anteriormente convencionales.

La mayoría de los depósitos de petróleo pesado y betún se encuentran dentro de las rocas más jóvenes (Cretácico y Neógeno-Paleógeno) a profundidades bajas (entre 200 m y 1,000 m). Los yacimientos de petróleo pesado y bitumen están (o estuvieron en algún momento) en contacto con la atmósfera, las aguas subterráneas poco profundas o los acuíferos de formación más profundos. Estos yacimientos pueden estar asociados a manantiales de agua, petróleo y alquitrán así como a lagos de alquitrán, filtraciones de petróleo, y volcanes de barro, que suelen estar cerca de fallas e inconformidades.

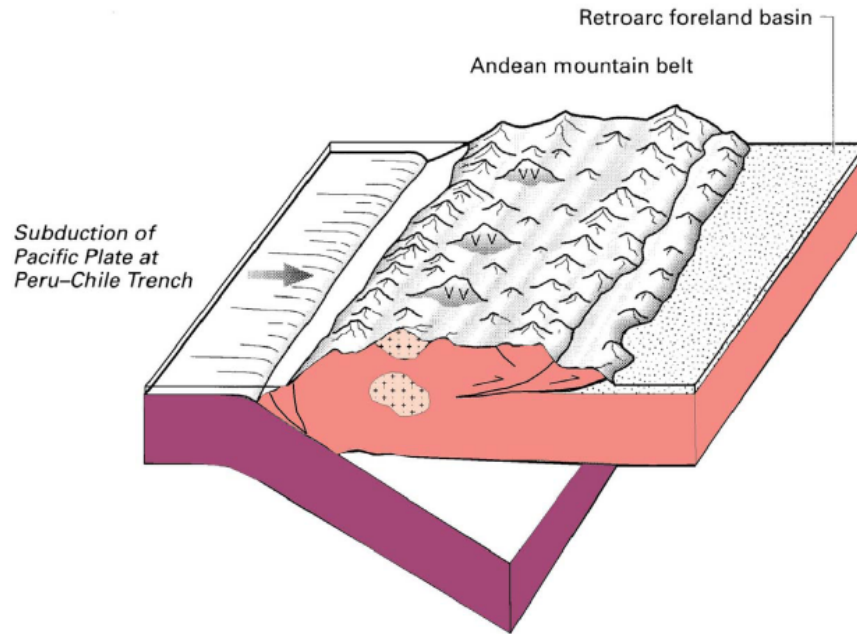
De los 6 a  $9 \times 10^{18}$  de barriles ( $0.9$  a  $1.4 \times 10^{18}$  m<sup>3</sup>) de petróleo pesado, petróleo extrapesado y bitumen que existen en el mundo, las acumulaciones más grandes están presentes en ambientes geológicos similares. Se trata de depósitos someros gigantes, entrampados en los flancos de las cuencas de antepaís.

Las cuencas de antepaís son depresiones enormes, formadas a raíz del hundimiento de la corteza terrestre durante la orogénesis (formación de montañas) como se puede observar en la Fig.1.2.

La biodegradación es la causa principal de la formación del petróleo pesado. A lo largo de las escalas de tiempo geológico, los microorganismos degradan los hidrocarburos livianos e intermedios, produciendo metano e hidrocarburos pesados enriquecidos. La biodegradación se asocia a un proceso de oxidación del petróleo, en la que se produce la relación gas/petróleo (GOR por sus siglas en inglés) y se incrementa la densidad, la acidez, la viscosidad, el contenido de azufre y de otros metales. A través de la biodegradación, los petróleos pierden además una importante fracción de su masa original.

Otros mecanismos, tales como el "lavado con agua y el fraccionamiento de fases, contribuyen a la formación de petróleo pesado, esto ocurre por medio de una separación de las fracciones livianas del petróleo pesado por medios físicos, más que biológicos. Las condiciones óptimas para la degradación microbiana de los hidrocarburos se dan en los yacimientos, a temperaturas inferiores a 80°C [176°F]; el proceso se limita por lo tanto a los yacimientos someros, situados a una profundidad de aproximadamente 4 km [2.5 millas].





**Figura 1.2:** Cuencas antepaís (Imagen tomada a partir de [www.usuarios.geofisica.unam.mx](http://www.usuarios.geofisica.unam.mx))

La acumulación de petróleo individual más grande que se conoce es la faja de petróleo pesado del Orinoco, en Venezuela. Las reservas estimadas en esta faja ascienden a  $1.2 \times 10^{18}$  de barriles [ $190,000$  millones de  $m^3$ ] de petróleo de 6 a  $12^\circ$  API. Por otra parte, las acumulaciones combinadas de petróleo extrapesado de la cuenca del oeste de Canadá, en Alberta, totalizan  $1.7 \times 10^{18}$  de bbl [ $270,000 \times 10^6$  de  $m^3$ ].

### 1.1.1. Panorama nacional

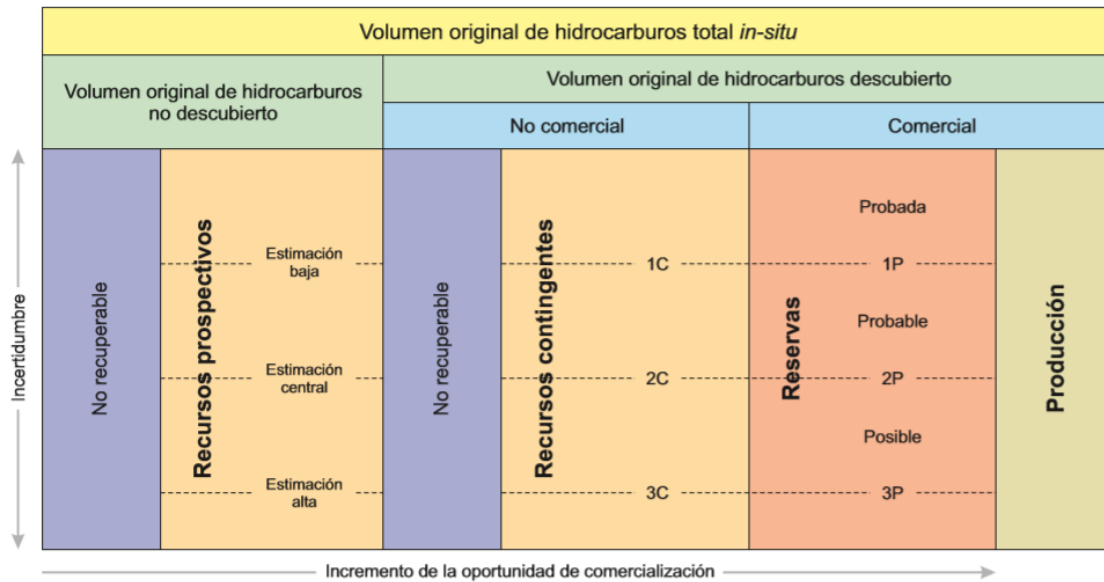
#### Recursos petroleros

Los recursos petroleros son todos los volúmenes de hidrocarburos que inicialmente se estiman en el subsuelo, referidos a condiciones de superficie. Sin embargo, desde el punto de vista de explotación, se le llama recurso únicamente a la parte potencialmente recuperable de esas cantidades. Dentro de esta definición, a la cantidad de hidrocarburos estimada en principio se le denomina volumen original de hidrocarburos total, el cual puede estar descubierto o no. Éste se refiere a la cuantificación referida a condiciones de yacimiento de todas las acumulaciones de hidrocarburos naturales. Asimismo a sus porciones recuperables se les denomina recursos prospectivos, recursos contingentes o reservas. En particular, el concepto de reservas constituye una parte de los recursos, es decir, son acumulaciones conocidas, recuperables y comercialmente explotables.

De la definición de recursos existen dos tipos de recursos que pueden requerir propuestas diferentes para su evaluación, recursos convencionales y no-convencionales. Los primeros se ubican en acumulaciones discretas relacionadas con un aspecto geológico estructural localizado y/o condición estratigráfica, típicamente cada acumulación está limitada por un contacto echado abajo asociado a un acuífero, y el cual es afectado significativamente por fuerzas hidrodinámicas identificadas como mecanismos de empuje. De esta forma, los hidrocarburos son recuperados mediante pozos y típicamente requieren de un procesado mínimo previo a su venta. Los recursos no-convencionales existen en acumulaciones diseminadas a través de grandes áreas y no son afectadas generalmente por influencias hidrodinámicas.

La clasificación de recursos se muestra en la Fig. 1.3, incluyendo a las diferentes categorías de reservas. Se observa que existen estimaciones bajas, medias y altas, tanto para los recursos como para las reservas, clasificándose estas últimas como probada, probada más probable, y probada más probable más posible, para cada una de las tres estimaciones anteriores, respectivamente.

El rango de incertidumbre que se ilustra a la izquierda de esta figura enfatiza que el conocimiento que se tiene de los recursos y de las reservas es imperfecto, por ello, se generan diferentes estimaciones que obedecen a diferentes expectativas. La producción, que aparece hacia la derecha, es el único elemento de la figura en donde la incertidumbre no aparece, debido a que ésta es medida, comercializada y transformada en un ingreso.



**Figura 1.3:** Clasificación de los recursos y reservas de hidrocarburos (no a escala). Adaptado de Petroleum Resources Management System, Society of Petroleum Engineers, 2007.(Imagen tomada a partir de Pemex (2017)).

### Distribución de las reservas de hidrocarburos

La Región Marina Noreste se localiza dentro de aguas territoriales nacionales frente a las costas de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, teniendo como límite la isobata de 500 metros de profundidad, conformándose por parte de la plataforma continental y el talud del Golfo de México.

La región se constituye por dos activos de producción Bloque AS01-01 (Cantarell) y Bloque AS01-02 (Ku-Maloob-Zaap) los cuales tienen dentro de sus actividades la responsabilidad de planear, programar y ejecutar los esquemas de desarrollo de los campos de hidrocarburos que administran, así como la reclasificación de reservas.

La evaluación de reservas de aceite pesado al 1 de enero de 2017, se registró un valor de 3,929.9 mmb de aceite en la categoría Probada, 6,372.2 mmb, en la categoría Probable, y 8,128.6 mmb, en la categoría de Posible, tabla 1.3.

La Región Marina Suroeste se ubica en aguas marinas de la plataforma y del talud continental del Golfo de México. Las asignaciones de extracción y de exploración otorgadas a Pemex se distribuyen dentro de un polígono que cubre un área aproximada a los 352,390

**Tabla 1.3:** Composición de las reservas por activo de la Región Noroeste.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017))

Reserva	Activo	Aceite		
		Pesado mmb	Ligero mmb	Superligero mmb
1P		3,929.9	57.5	0.0
	Cantarell	883.7	57.5	0.0
	Ku-Maloob-Zaap	3,046.3	0.0	0.0
2P		6,372.2	68.0	0.0
	Cantarell	2,292.4	68.0	0.0
	Ku-Maloob-Zaap	4,079.8	0.0	0.0
3P		8,128.6	76.0	0.0
	Cantarell	3,168.8	76.0	0.0
	Ku-Maloob-Zaap	4,959.9	0.0	0.0

kilómetros cuadrados. En la porción Sur, colinda con los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, hacia el Este con la Región Marina Noreste, y al Norte y Poniente está limitada por las aguas territoriales nacionales.

Los activos de producción Abkatún-Pol-Chuc y Litoral de Tabasco conforman la estructura de la Región Marina Suroeste, cuyo objetivo es el de fortalecer la gestión de los yacimientos a lo largo de su vida productiva.

La evaluación de reservas de aceite pesado al 1 de enero de 2017, se registró un valor de 62.2 mmb de aceite en la categoría Probada, 266.8 mmb, en la categoría Probable, y 498.2 mmb, en la categoría de Posible, tabla 1.4.

La Región Norte está constituida por una parte continental y otra marina. Geográficamente se localiza en la franja Norte de la República Mexicana, colindando al Norte con los Estados Unidos de América y sus aguas territoriales del Golfo de México, al Sur con el río Tesechoacán ubicado en el estado de Veracruz y con un límite convencional que se prolonga en forma horizontal a partir de dicha referencia hacia la costa del Océano Pacífico y se extiende hasta el límite de las aguas territoriales, al Oriente con la línea de costa del estado de Veracruz,

**Tabla 1.4:** Composición de las reservas por activo de la Región Suroeste.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017))

Reserva	Activo	Aceite		
		Pesado mmb	Ligero mmb	Superligero mmb
1P		62.2	560.9	245.6
	Abkatún-Pol-Chuc	18.3	322.3	16.9
	Litoral de Tabasco	43.9	238.7	228.7
2P		266.8	1,020.6	340.8
	Abkatún-Pol-Chuc	103.1	513.0	26.0
	Litoral de Tabasco	163.7	507.6	314.7
3P		498.2	1,414.4	587.6
	Abkatún-Pol-Chuc	129.7	611.7	26.7
	Litoral de Tabasco	368.5	802.7	560.9

la isobata de 500 metros del Golfo de México y los límites con la Región Marina Suroeste (AS02), y al Occidente con aguas internacionales del Océano Pacífico.

Se conforma por tres activos de producción; Aceite Terciario del Golfo, Poza Rica-Altamira y Veracruz, por el Activo Integral Burgos, por el Activo de Exploración Aguas Profundas y por la Gerencia de Asignaciones Aguas Profundas.

Los activos de producción y el integral se enfocan primordialmente a las actividades de explotación de los campos, de su desarrollo, así como a la optimización de su operación. Mientras que el activo de exploración tiene como objetivo principal la adición de reservas por actividades de esta índole, así como la evaluación del potencial que presentan las cuencas de Burgos, Sabinas, Tampico-Misantla y la porción Norte del Golfo de México Profundo. Asimismo, la Gerencia de Asignaciones Aguas Profundas tiene como principal objetivo el desarrollo de los campos ubicados en aguas profundas.

La evaluación de reservas de aceite pesado al 1 de enero de 2017, se registró un valor de 417.1 mmb de aceite en la categoría Probada, 1,115.4 mmb, en la categoría Probable, y 2,135 mmb, en la categoría de Posible, tabla 1.6. El área de la Región Sur comprende los estados de Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas, Yucatán y Quintana Roo.

Se conforma por cuatro activos de producción Bellota-Jujo, Cinco Presidentes, Macuspana-Muspac y Samaria-Luna. El mayor número de campos pertenecen al Activo de Producción Macuspana-Muspac que posee 31 campos, le siguen los activos Bellota-Jujo con 26 campos, Cinco Presidentes con 19 campos, y finalmente Samaria-Luna con 15 campos.

La evaluación de reservas de aceite pesado al 1 de enero de 2017, se registró un valor de 96.2 mmb de aceite en la categoría Probada, 130.4 mmb, en la categoría Probable, y 211.7 mmb, en la categoría de Posible, Fig.??.

**Tabla 1.5:** Composición de las reservas por activo de la Región Norte. (Tabla modificada a partir de Pemex (2017))

Reserva	Activo	Aceite		
		Pesado mmb	Ligero mmb	Superligero mmb
1P		417.1	366.5	4.6
	Aceite Terciario del Golfo	266.7	241.9	4.6
	Burgos	0.0	0.0	0.0
	Poza Rica-Altamira	147.2	79.8	0.0
	Veracruz	3.2	44.8	0.0
2P		1,115.4	1,214.0	82.3
	Aceite Terciario del Golfo	910.3	1,014.4	82.2
	Burgos	0.0	0.0	0.0
	Poza Rica-Altamira	198.7	139.1	0.0
	Veracruz	6.5	60.5	0.0
3P		2,135	2,092.1	647.6
	Aceite Terciario del Golfo	1,447.6	1,758.2	377.2
	Burgos	0.0	0.0	0.0
	Poza Rica-Altamira	678.7	269.6	270.4
	Veracruz	8.7	64.3	0.0

**Tabla 1.6:** Composición de las reservas por activo de la Región Sur.(Tabla modificada a partir de Pemex (2017))

Reserva	Activo	Aceite		
		Pesado mmb	Ligero mmb	Superligero mmb
1P		96.2	578.9	217.8
	Bellota-Jujo	23.0	282.2	66.1
	Cinco Presidentes	19.9	126.3	3.3
	Macuspana-Muspac	1.3	17.0	30.0
	Samaria-Luna	52.1	153.5	118.4
2P		130.4	644.8	262.8
	Bellota-Jujo	26.0	317.3	99.3
	Cinco Presidentes	22.3	151.5	4.3
	Macuspana-Muspac	3.5	22.5	36.4
	Samaria-Luna	78.6	153.5	122.9
3P		211.7	708.8	381.8
	Bellota-Jujo	26.0	356.5	117.9
	Cinco Presidentes	22.3	174.8	6.8
	Macuspana-Muspac	3.5	23.9	62.9
	Samaria-Luna	159.9	153.5	194.2



## 1.2. Antecedentes

El glicerol se usa tradicionalmente en jabones, cosméticos, productos de cuidado personal, productos farmacéuticos y productos alimenticios. Todos estos sectores no pueden drenar el creciente excedente de glicerol en la producción de biodiesel. Otras aplicaciones, como el suplemento para alimentos de origen animal, la fermentación del biogás y las formulaciones de fluidos para mejorar la recuperación de petróleo están adquiriendo importancia en los últimos años. Sin embargo, la aplicación más prometedora se encuentra en la industria química, como materia prima barata y renovable para la producción de polímeros y productos químicos especiales Mota et al. (2017).

El glicerol es el 1,2,3-propanotriol. Primero fue identificado en 1779 por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele, al calentar aceite de oliva con litargirio. El líquido viscoso que se separó de la fase oleosa se llamó glicerol debido a su sabor dulce (del griego glykos = dulce).



**Figura 1.4:** Carl Wilhelm Scheele

El término "glycerine o glycerin" se aplica a productos comerciales, que tienen al menos 95% en peso de glicerol. Algunas propiedades de glicerol se muestran en la Tabla 1.7. Es un líquido polar, viscoso y transparente a temperatura ambiente, soluble en agua y medios polares e insoluble en hidrocarburos y otros medios no polares.

Aunque el punto de fusión está cerca de los 18 °C, pequeñas cantidades de agua disuelta perjudican la cristalización del glicerol, que permanece como líquido a temperaturas significativamente más bajas. Una mezcla eutéctica de dos partes de glicerol y una parte de agua se congela a -46.5 °C.

Descripción	
Formula molecular	$C_3H_5(OH)_3$
Peso molecular(g)	92
Punto de fusión( $^{\circ}C$ )	17.8
Punto de ebullición( $^{\circ}C$ )	290
Viscosidad ( $Pa \cdot s^{-1}$ )	1.5
Presión de vapor a $20^{\circ}C$ (mmHg)	< 1
Densidad a $20^{\circ}C$ ( $gmL^{-1}$ )	1.261
Punto de inflamabilidad ( $^{\circ}C$ )	160
Temperatura crítica ( $^{\circ}C$ )	492.2
Presión critica (atm)	42.5

**Tabla 1.7:** Algunas propiedades de glicerina (Tabla modificada a partir de Mota et al. (2017))

Uno de los primeros usos del glicerol fue en forma de trinitrato. En 1846, Ascanio Sobrero trató glicerol con una mezcla de ácidos nítrico y sulfúrico concentrados, a bajas temperaturas, aislando un líquido oleoso, el trinitrato de glicerol o simplemente nitroglicerina.

La naturaleza explosiva de estos compuestos atrajo gran interés, pero fue solo el descubrimiento de Alfredo Nobel en 1863, cuya voladura pudo controlarse al mezclar nitroglicerina con sílice, que encontró aplicación comercial con el nombre de dinamita. Hoy en día, sigue siendo el principal explosivo utilizado en construcciones y demoliciones, pero también encuentra aplicación en la medicina como un vasodilatador, Mota et al. (2017).

El glicerol se usa ampliamente en alimentos y bebidas, donde actúa como humectante, edulcorante y conservante. El queso, el yogur, la leche en polvo, la leche condensada, la pasta precocida, la avena arrollada, los cereales para el desayuno, el arroz o el budín de tapioca, los panes o los batidos son algunos de los productos alimenticios que pueden contener glicerina. Algunas bebidas alcohólicas, de sidra y con sabor pueden contener glicerina, que también puede estar presente en las salsas, el vinagre, la mostaza, los condimentos, los edulcorantes de mesa, las formulaciones de mantequilla y manteca de nueces, así como en dulces y sopas. La glicerina puede proporcionar 4.32 kcal/g de valor de energía alimentaria.

Además de los usos tradicionales en los sectores farmacéutico y de cuidado personal, el glicerol de la producción de biodiesel está encontrando aplicaciones como suplemento alimenticio de animales y fluidos para mejorar la recuperación de petróleo.

El glicerol crudo de la producción de biodiesel se ha utilizado en fluidos para una mejor recuperación del petróleo. Sin embargo, este uso está limitado por la logística, ya que los campos petroleros deben estar muy cerca de las plantas de biodiesel, para evitar el gasto excesivo con el transporte, Mota et al. (2017).

### 1.2.1. Importancia de fluidos modelo en la industria

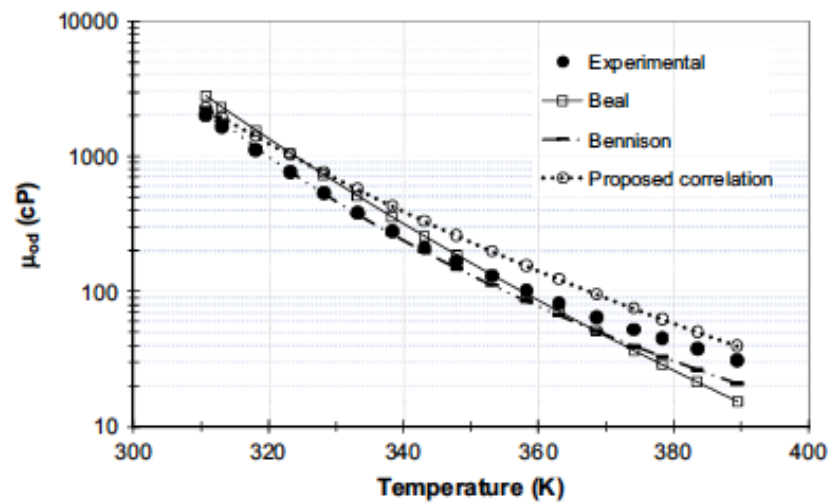
Algunos de los autores que han abordado temas de investigación sobre la glicerina en cada una de sus áreas de aplicación son Mota et al. (2017) con su libro "Glycerol a Versatile Renewable Feedstock for the Chemical Industry" describe sus usos, propiedades y métodos de transformación. Segur & Oberstar (1951) publicaron datos de viscosidades sobre mezclas de glicerina con agua de 273.15 a 373.15 K en todo el rango de composiciones. Este trabajo se realizó con los viscosímetros Cannon y Feske, con el objetivo de corregir datos previos, proporcionando una comparación exhaustiva con los resultados anteriores en intervalos de temperatura y composición más estrechos. Shankar & Kumar (1994) realizaron experimentos para obtener la viscosidad cinemática de mezclas de glicerol y agua, para todos los intervalos de composición en intervalos de temperatura entre 283.15 y 323.15 K, utilizando viscosímetro tipo Ubbelohde.

Chenlo et al. (2004), realizaron mediciones de viscosidad cinemática para soluciones acuosas que contenían glicerol y cloruro de sodio. Para mediciones de las mezclas de glicerol y agua con un intervalo de temperatura de 293.15 a 323.15 K. Trejo González et al. (2011), calcularon la viscosidad de mezclas de glicerol y agua de todo en rango de composiciones, y dentro del intervalo de temperatura de 238.15 y 273.15 K, integrando así la región de congelamiento.

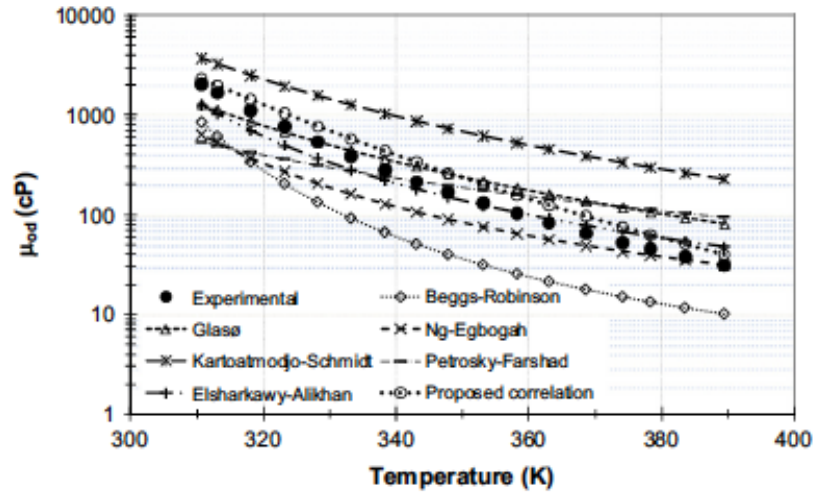
La importancia de la glicerina en el área de hidrocarburos reside en la similitud de la viscosidad de la glicerina pura ( $\sim 1,500$  cP) y el crudo extra pesado ( $< 1,000$  cP Fig.1.1) además la glicerina brinda mejores condiciones de operación en las simulaciones de flujo y no es necesario llevarlas a algún tipo de proceso para desecharla. El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) de la Cruz et al. (2013) reportó en su artículo *Measurements and correlation of Mexican heavy dead crude oil viscosities* una serie de gráficas de la viscosidad dinámica contra temperatura de crudos muertos de pozos mexicanos, donde realizaron pruebas de viscosidad a siete crudos muertos utilizando un viscosímetro modelo SPL 440 que fue diseñado y manufacturado por Cambridge Applied Systems (CAS,USA) utilizada para la medición de la viscosidad de líquidos en un intervalo de 0.2-10,000 cP para presiones hasta 137.9 MPa y

para temperaturas hasta 190°C.

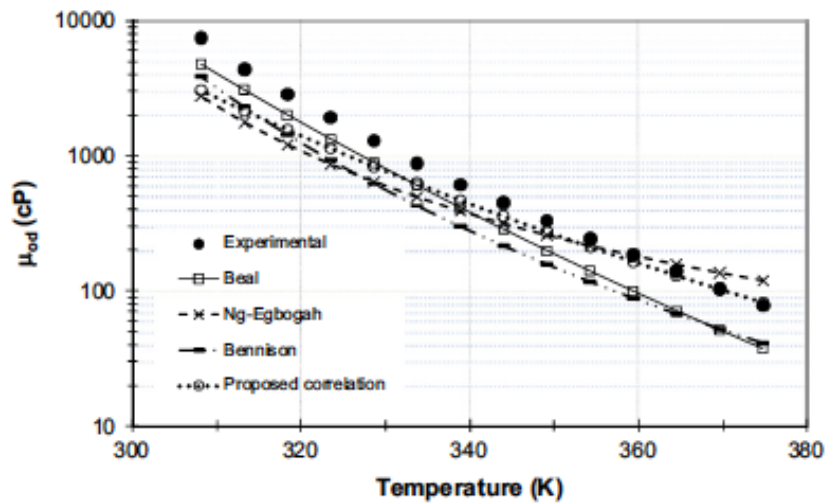
Algunas de las gráficas que obtuvieron para los diferentes crudos pesados se muestran a continuación. Las figuras 1.5, 1.6 y 1.7, comparan los datos de la viscosidad de los diferentes crudos con correlaciones y datos experimentales y muestran comportamientos muy parecidos, además, las muestras de aceite se obtuvieron en un intervalo de temperatura de 397.1 a 300.8 K, y viscosidades en el intervalo de 10.9-7476.7 cP, aceite °API de 11.5 a 19.4, y a una presión constante de 0.1 MPa con una incertidumbre estimada de viscosidad menor a 71.0 % sobre el intervalo de temperatura de las mediciones.



**Figura 1.5:** Las mejores correlaciones para predecir la viscosidad del aceite crudo contra la temperatura en comparación con los datos experimentales para el aceite 4 (densidad API del aceite de 12,0) (Gráfica tomada a partir de de la Cruz et al. (2013))



**Figura 1.6:** La viscosidad predicha del petróleo crudo contra la temperatura en comparación con los datos experimentales para el aceite 4 (densidad API del aceite de 12,0) (Gráfica tomada a partir de de la Cruz et al. (2013))



**Figura 1.7:** Las mejores correlaciones para predecir la viscosidad del aceite crudo contra la temperatura en comparación con los datos experimentales para el aceite 1 (densidad API del aceite de 11.5). (Gráfica tomada a partir de de la Cruz et al. (2013))

### 1.3. Objetivos de la tesis

Elaborar una guía experimental sobre la medición de la viscosidad dinámica con diluciones de glicerina y agua para futuros trabajos de investigación en el laboratorio de flujo multifásico del Instituto de Ingeniería.

#### 1.3.1. Alcances

1. Obtener resultados de viscosidad dinámica para diluciones de glicerina y agua desde 50 %wt hasta 100 %wt, con un aumento de 10 %wt entre cada emulsión, dentro de un intervalo de temperatura de 20°C hasta 60°C.
2. Reportar la variación de la viscosidad dinámica para las diferentes diluciones de glicerina utilizada en el laboratorio de flujo multifásico del instituto de ingeniería.
3. Comparar los resultados obtenidos con datos reportados previamente, y con modelos matemáticos derivados para este tipo de emulsión.
4. Analizar las diferencias en los datos reportar su naturaleza y las modificaciones pertinentes para ajustar los datos.

#### 1.3.2. Hipótesis

En virtud del conocimiento que se tiene a priori sobre el fenómeno físico, se espera:

*En general, cualquier fluido que se exponga a cambios de temperatura modificará su viscosidad.*

*La viscosidad de diluciones se determina por el porcentaje de los elementos involucrados.*

*El tamaño de la muestra es sensible al entorno experimental el cual puede modificar los resultados de la viscosidad sin importar la presencia de alguna fuente de calor directa.*

# Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO

El estudio de la mecánica de fluidos tiene como objetivo describir el comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento, en general se considera a los fluidos en reposo como un caso especial con velocidad cero. Cada sistema transforma distintos tipos de energía, como pueden ser la energía térmica, cinética, potencial, eléctrica, etc. La suma de estas diferentes energías del sistema se le llama energía total  $E$ , también se debe tomar en cuenta la energía interna del sistema  $U$  ya que es la suma de las energías microscópicas. La mecánica de fluidos estudia generalmente sistemas compresibles en los que ciertos efectos magnético, eléctrico y nuclear pueden ser ignorados.

### 2.1. Propiedades de transporte de fluidos

Bird et al. (2004), describió la viscosidad como la propiedad física que caracteriza la resistencia al flujo de los fluidos. Generalmente reportado en unidades de poise P y centipoise cP.

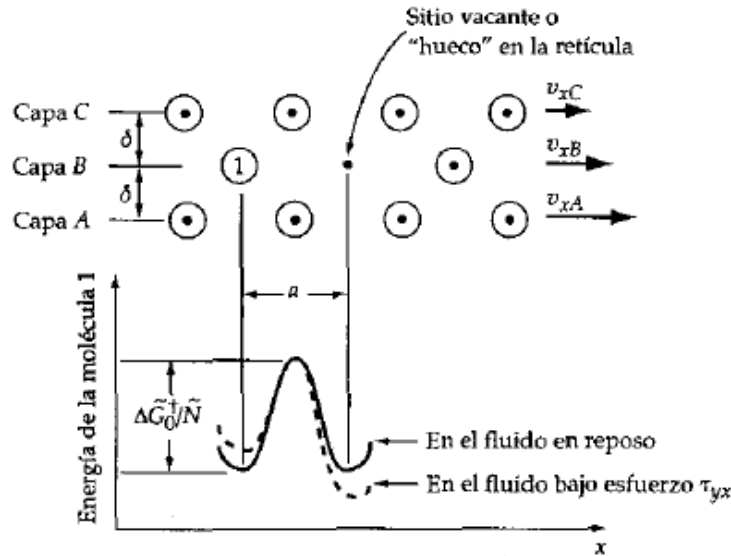
$$1\text{P} = 10^{-1}\text{Pa} \cdot \text{s} = 10^{-1}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$$

Para poder entender el comportamiento de los fluidos que son sometidos a deformaciones es importante saber que los fluidos se clasifican en fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos, los cuales serán brevemente explicados a continuación.

### 2.1.1. Teoría molecular de la viscosidad de líquidos

Bird et al. (2004) describe en el capítulo 1.5 la teoría de Eyring y sus colaboradores brindando una descripción cualitativa del mecanismo de transporte de cantidad de movimiento en líquidos. Esta teoría dice que en un líquido en reposo, las moléculas individuales están en constante movimiento, el cual está limitado por la cercanía entre las moléculas, y cada molécula se encuentra restringida por una vibración dentro de una *caja* que representa un medio de barrera el cual se ilustra en la Fig. 2.1,  $\delta$  es la distancia entre capas de las moléculas.

Esta barrera tiene una altura  $\Delta\tilde{G}_o^\ddagger/\tilde{N}$ , donde  $\Delta\tilde{G}_o^\ddagger$  es la energía libre de activación molar para escapar de la caja en el fluido estacionario.



**Figura 2.1:** Ilustración de proceso de escape en el flujo de un líquido. (Imagen tomada a partir de Bird et al. (2004) capítulo 1.5).

Un líquido en reposo experimenta continuamente reordenamientos donde las moléculas que se mueven en cada dirección con longitud  $a$ , a una frecuencia  $\nu$  por molécula, expresada por

$$\nu = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{-\Delta G_o^\ddagger}{RT}\right)$$

donde  $k$  y  $h$  son, respectivamente, las constantes de Boltzman ( $1.38 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ ) y Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ), respectivamente,  $\tilde{N}$  es el número de Avogadro ( $6.0225 \times 10^{23}$ ) y  $R = \tilde{N}k$  ( $8.314 \text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$ ) es la constante del gas.



En un fluido que circula en dirección  $x$  (Fig. 2.1) con un gradiente de velocidad  $dv_x/dy$ , la frecuencia de los reordenamientos aumenta. El efecto se puede explicar al considerar la barrera de energía potencial como es distorsionada bajo el esfuerzo de  $\tau_{yx}$  de modo que

$$-\Delta\tilde{G}_o^\ddagger = -\Delta G_o^\ddagger \pm \left(\frac{a}{\delta}\right) \left(\frac{\tau_{yx}\tilde{V}}{2}\right)$$

donde  $\tilde{V}$  es el volumen de un mol de líquido y  $\pm(a/\delta)(\tau_{yx}\tilde{V}/2)$  es una aproximación al trabajo de las moléculas a medida que se mueven hacia la parte superior de la barrera de energía. Los signos se refieren al esfuerzo cortante aplicado (signo +) o contra el esfuerzo cortante aplicado (signo -).

Definimos  $\nu_+$  como la frecuencia de saltos hacia adelante y  $\nu_-$  la frecuencia de saltos<sup>1</sup> hacia atrás de la molécula Fig. 2.1, entonces la diferencia entre saltos estaría dada por (Bird et al. 2004)

$$\nu_{\pm} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\Delta\tilde{G}_o^\ddagger/RT\right) \exp\left(\pm a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT\right) \quad (2.1)$$

la velocidad neta con que las moléculas en la capa A se deslizan por encima de las que están en la capa B (Fig.2.1) es justamente la distancia recorrida por salto,  $a$ , multiplicada por por la frecuencia neta de saltos adelante ( $\nu_+ - \nu_-$ ), proporcionando así

$$\nu_{xA} - \nu_{xB} = a(\nu_+ - \nu_-)$$

de este modo el perfil de velocidad puede considerarse lineal sobre la distancia  $\delta$  que hay entre las capas A y B, Fig.2.1

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right) (\nu_+ - \nu_-) \quad (2.2)$$

Al combinar las ecuaciones 2.1 y 2.2 finalmente se obtiene

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right) \left(\frac{kT}{h} \exp\left(-\Delta\tilde{G}_o^\ddagger/RT\right)\right) \left(\exp\left(a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT\right) - \exp\left(-a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT\right)\right)$$

y por lo tanto

$$-\frac{dv_x}{dy} = \left(\frac{a}{\delta}\right) \left(\frac{kT}{h} \exp\left(-\Delta\tilde{G}_o^\ddagger/RT\right)\right) \left(2 \sinh \frac{a\tau_{yx}\tilde{V}}{2\delta RT}\right) \quad (2.3)$$

Esta ecuación predice una relación no lineal entre el esfuerzo cortante (densidad de flujo de cantidad de movimiento) y el gradiente de velocidad. Esta característica es típica de un flujo no newtoniano.

<sup>1</sup>La molécula alcanzó la energía necesaria para pasar la barrera que se ilustra en la Fig. 2.1

Una situación general ocurre cuando  $a\tau_{yx}\tilde{V}/2\delta RT \ll 1$  Expandiendo en la serie de Taylor  $\sinh x = x + (1/3!)x^3 + (1/5!)x^5 + \dots$ , se obtiene, a partir de la ecuación 2.3, la viscosidad

$$\mu = \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \frac{\tilde{N}h}{\tilde{V}} \exp\left(-\Delta\tilde{G}_o^+/RT\right) \quad (2.4)$$

el factor  $\delta/a$  puede tomarse como la unidad sin implicar una pérdida de generalidad.  $\Delta\tilde{G}_o^+$  suele determinarse empíricamente para hacer que la ecuación 2.4 coincida con datos experimentales de viscosidad, las energías libres de activación determinadas a datos experimentales de viscosidad contra temperatura son casi constantes para un fluido dado que están relacionadas la energía interna de vaporización en el punto de ebullición normal

$$\Delta\tilde{G}_o^+ \approx 0.408\Delta\tilde{U}_{vap}$$

entonces la ecuación 2.4 se convierte en

$$\mu = \frac{\tilde{N}h}{\tilde{V}} \exp\left(0.408\Delta\tilde{U}_{vap}/RT\right) \quad (2.5)$$

Además la energía de vaporización en el punto de ebullición normal puede estimarse aproximadamente a partir de la regla de Trouton, Castellan & Basín (n.d.)

$$\Delta\tilde{U}_{vap} \approx \Delta\tilde{H}_{vap} - RT_b \cong 9.4RT_b$$

Con esta aproximación adicional se transforma a

$$\mu = \frac{\tilde{N}h}{\tilde{V}} \exp(3.8T_b/T) \quad (2.6)$$

Las ecuaciones 2.5 y 2.6 que coinciden con la fórmula empírica  $\mu = A \exp(B/T)$ .

### 2.1.2. Ley de Newton de la viscosidad

Los fluidos newtonianos se describen por las relaciones de esfuerzo y gradientes de velocidad mediante la ecuación 2.7 para flujo cortante simple y mediante la ecuación 2.8 para flujos arbitrarios que dependen del tiempo.

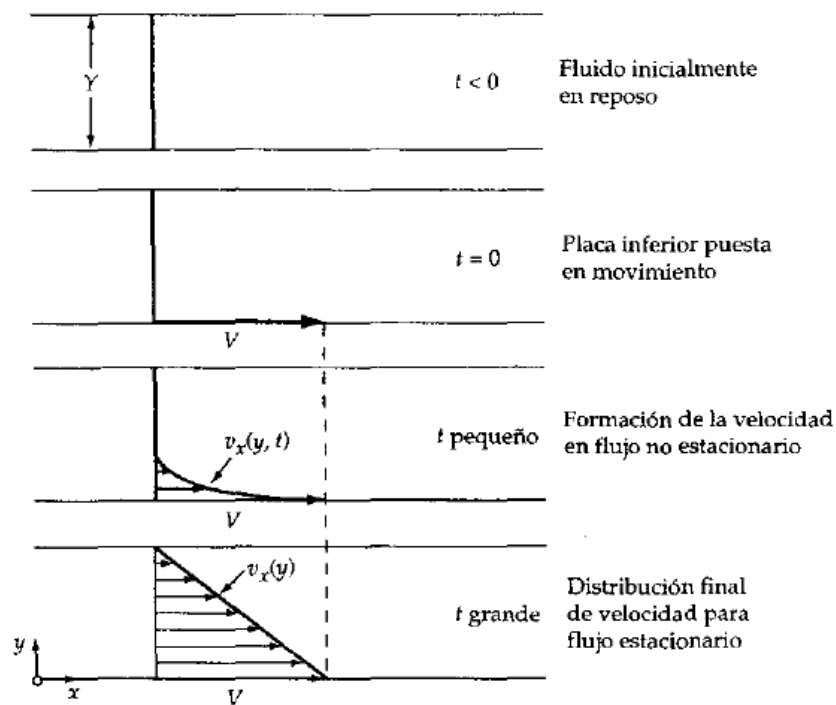
$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2.7)$$

Donde  $\tau_{yx}$  es el esfuerzo cortante que se ejerce en dirección X sobre la superficie del fluido, situada a una dirección Y,  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\frac{dv_x}{dy}$  es la velocidad de corte o cizalla, Fig.2.2.

$$\tau = -\mu(\nabla v + (\nabla v)^\dagger) + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa\right)(\nabla \cdot v)\delta \quad (2.8)$$

La ecuación 2.8 son las relaciones de esfuerzo en un fluido newtoniano asociadas con los nombres Navier, Poisson y Stokes escrita con notación vector-tensor, donde  $\delta$  es el tensor unitario con componentes  $\delta_{ij}$ ,  $\nabla v$  es el tensor del gradiente de velocidad con componentes  $(\partial/\partial x_i)v_j$ ,  $(\nabla v)^\dagger$  es la matriz transpuesta del tensor del gradiente de velocidad con componentes  $(\partial/\partial x_j)v_i$ ,  $\nabla \cdot v$  es la divergencia del vector de velocidad,  $\mu$  es la viscosidad y  $\kappa$  es la viscosidad dilatacional. La viscosidad dilatacional  $\kappa$  es importante para describir la absorción del sonido en gases poliatómicos y para describir la dinámica de fluidos que contienen burbujas gaseosas.

Para el fluido newtoniano se requieren dos parámetros del material, los coeficientes de viscosidad  $\mu$  y  $\kappa$ , que dependen de temperatura, presión y composición, pero no de los gradientes de velocidad.



**Figura 2.2:** Formación de perfil de velocidad en estado estacionario para un fluido contenido entre dos láminas (Imagen tomada a partir de Bird et al. (2004))

Esta es la Ley de Newton de la viscosidad y los fluidos que la cumplen son llamados fluidos newtonianos. La mayor parte de los fluidos simples están bien descritos por dicha ecuación. Los fluidos que no obedecen esta ley son esencialmente pastas, suspensiones y polímeros de elevado peso molecular, y son denominados fluidos no newtonianos Bird et al. (2004). Tipos

de viscosidad:

- Viscosidad cinemática: relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

- Viscosidad dinámica o absoluta: definida con la Ley de Newton de la viscosidad  $\mu$

En el caso de los gases de baja densidad la viscosidad aumenta con la temperatura, mientras que en el caso de los líquidos la viscosidad generalmente disminuye al aumentar la temperatura. Desde un punto de vista molecular, en el caso de los gases (en los que las moléculas recorren distancias grandes entre las colisiones), la cantidad de movimiento se transporta esencialmente por las moléculas que se desplazan libremente, mientras que en los líquidos (en los que las moléculas recorren solamente distancias muy cortas entre las colisiones), el mecanismo principal del transporte de cantidad de movimiento consiste en el choque efectivo de las moléculas, Bird et al. (2004).

Las viscosidades de la mayoría de los líquidos no son afectadas por presiones moderadas pero se han encontrado grandes incrementos a presiones sumamente elevadas. Por ejemplo la viscosidad del agua a 10.000atm es el doble que a 1 atm. Compuestos de mayor complejidad muestran un aumento en la viscosidad de varios órdenes de magnitud sobre el mismo intervalo de temperatura. Por esta razón en los usos de la mayoría de los fluidos este factor apenas se toma en consideración; pero hay casos, como en la industria de lubricantes, donde las medidas de viscosidad deben tomarse a elevadas presiones.

### Modelo exponencial Barus y Kuss

Es un modelo que expresa la viscosidad en función de la presión.

$$\mu = \mu_o \exp \alpha P$$

donde  $\mu_o$  es la viscosidad a presión atmosférica,  $\mu$  es la viscosidad a la presión P,  $\alpha$  es un parámetro que, según Worster, equivalen a:

$$\alpha = (0.6 + 0.965 \log \mu) \cdot 10^3$$

Esta expresión no es más que una aproximación y no es válida para todos los casos. Para presiones muy altas, es preferible utilizar:

$$\mu = \mu_o(1 + CP)^n$$

donde C y n son constantes específicas para una temperatura determinada.

### Ecuación de Arrhenius

La ecuación de Arrhenius describe el comportamiento de la viscosidad al aumentar la temperatura. Cuando aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a la disminución de la viscosidad. Por ello se deben extremar precauciones al medir la viscosidad, teniendo en cuenta que la temperatura debe permanecer constante.

$$\mu = A \exp \frac{B}{T} \quad (2.9)$$

donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica, A y B son las constantes dependientes del líquido, y  $T$  es la temperatura absoluta en °C.

La ecuación de Arrhenius (normal y modificada) es adecuada para muchas disoluciones cuando se encuentran por encima de su temperatura de transición vítrea.

$$\log \frac{\eta}{\eta_o} = E_a \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right)$$

donde  $E_a$  es a energía de activación en J/mol,  $\eta_o$  es la viscosidad conocida a una temperatura  $T_o$ , T es la temperatura a la que se quiere conocer la viscosidad  $\eta$ .

### 2.1.3. Fluidos no Newtonianos

Los fluidos no newtonianos son estudiados en el contexto de la reología, que tiene como objetivo observar el comportamiento de las sustancias sometidas a deformaciones Ramírez-Navas (2006).

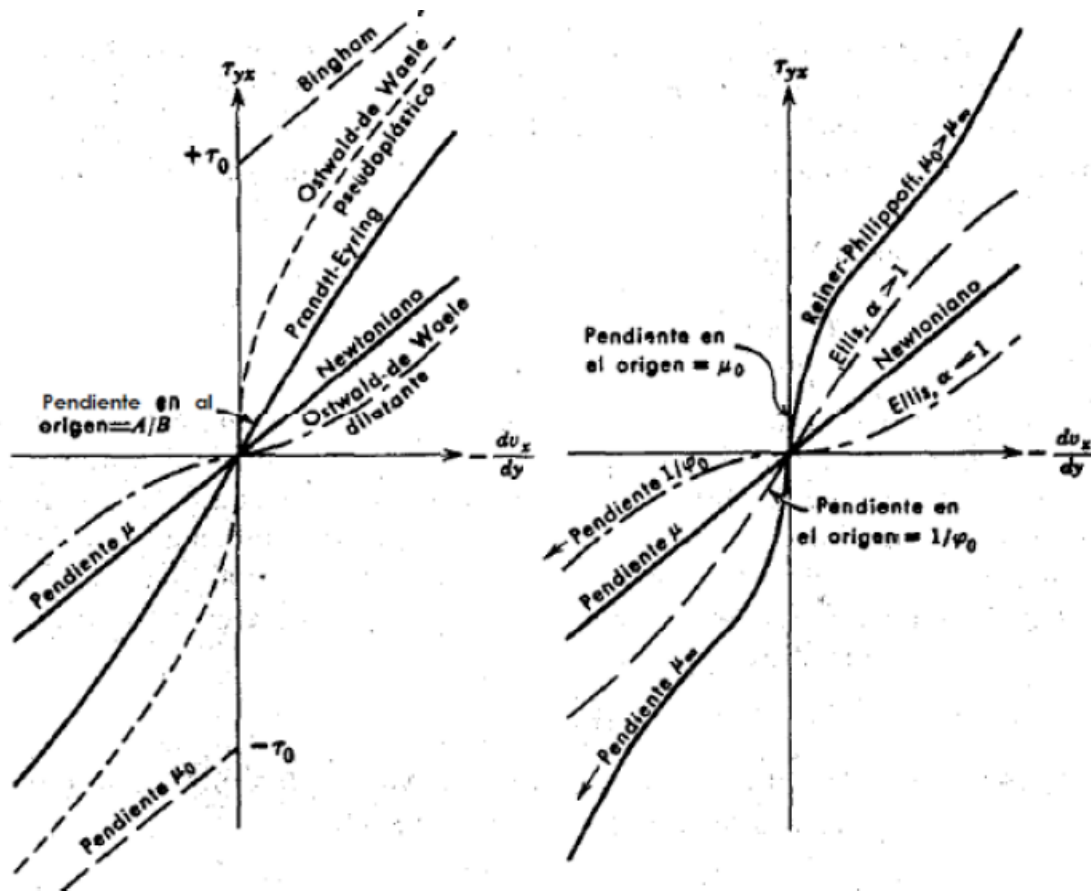


Figura 2.3: Comportamiento de fluidos newtonianos y no newtonianos (Imagen tomada a partir de Bird et al. (2004))

En la Fig. 2.3 se muestran los diferentes comportamientos de los fluidos, a continuación se describen varios modelos de viscosidad que dependen de la tasa de cizalladura.

- Modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = -\mu_0 \frac{dV_x}{dy} \pm \tau_0$$

si

$$|\tau_{yx}| > \tau_0$$

$$\frac{dV_x}{dy} = 0$$

si

$$|\tau_{yx}| < \tau_0$$

Este comportamiento describe a cualquier sustancia que requiera de un esfuerzo cortante mayor a un determinado  $\tau_o$  para que comience a fluir; se les denomina plásticos de Bingham. Por debajo de este esfuerzo, la viscosidad se considera infinita. El concepto de esfuerzo cortante límite aparece cuando a gradientes de velocidad muy bajos persiste un esfuerzo cortante no despreciable, pero es probablemente un concepto inexacto. Lo que sucede en realidad es que la escala de tiempo experimental es limitada, y no permite medir gradientes de velocidad tan bajos que requieran excesivo tiempo de ensayo y no se tiene la resolución adecuada. Al aplicar un esfuerzo cortante más pequeño que el esfuerzo cortante límite se considera que el gradiente de velocidad es nulo ya que en el tiempo de duración del ensayo no se detecta ninguna deformación, pero probablemente presenta un valor muy bajo distinto de cero. De todo ello resulta que el esfuerzo cortante límite es más bien un dato extrapolado que una realidad física, y lo que sucede en realidad es que se tiene una viscosidad muy grande para valores muy bajos del gradiente de velocidad.

- Modelo de Ostwald-de Waele (ley de potencia)

$$\tau_{yx} = -m \left| \frac{dV_x}{dy} \right|^{n-1} \quad (2.10)$$

El modelo de Ostwald representa tres tipos de comportamientos en una ecuación pues si el valor de  $n < 1$  se presenta un comportamiento pseudoplástico, cuando  $n > 1$  es un comportamiento dilatante y cuando  $n = 1$  se trata de un fluido newtoniano.

- Modelo de Eyring

$$\tau_{yx} = A \sinh \left( \frac{1}{B} \frac{dV_x}{dy} \right) \quad (2.11)$$

Este modelo de dos parámetros predice dos comportamientos dependiendo del valor de  $\tau_{yx}$ , predice el comportamiento pseudoplástico para valores finitos de  $\tau_{yx}$  y tiende asintóticamente a la ley de viscosidad de Newton cuando  $\tau_{yx}$  tiende a cero.

- Modelo de Ellis

$$-\frac{dV_x}{dy} = (\varphi_o + \varphi_1 |\tau_{yx}|^{\alpha-1}) \tau_{yx} \quad (2.12)$$

Este modelo tiene tres parámetros positivos ajustables  $\varphi_o$ ,  $\varphi_1$  y  $\alpha$ . Si se toma para  $\alpha > 1$  entonces el modelo tiende hacia la ley de Newton para valores bajos de  $\tau_{yx}$ , mientras que si  $\alpha < 1$  entonces la ley de Newton se establece para valores elevados de  $\tau_{yx}$ . En este modelo se pueden comprender la ley de Newton y la ley de Potencia.

- Modelo de Reiner-Philippoff

$$-\frac{dV_x}{dy} = \left( \frac{1}{\mu_\infty} + \frac{\mu_o - \mu_\infty}{1 + \left(\frac{\tau_{yx}}{\tau_s}\right)^2} \right) \tau_{yx} \quad (2.13)$$

Este modelo tiene tres parámetros ajustables  $\mu_o$ ,  $\mu_\infty$  y  $\tau_s$ . Teniendo en cuenta que el comportamiento Newtoniano se presenta para valores muy bajos o muy elevados del gradiente de velocidad éste modelo fue planteado con el fin de transformar  $\mu = \mu_o$  y  $\mu = \mu_\infty$  respectivamente. La curva que resulta al representar gráficamente  $\tau_{yx}$  frente a  $\frac{dV_x}{dy}$  muestra dos puntos de inflexión, que corresponden a valores de

$$\tau_{yx} = \pm \tau_s \sqrt{3\mu_o/\mu_\infty} \quad (2.14)$$

Además en estado estacionario se puede presentar formas de comportamiento no Newtoniano. Los fluidos tixotrópicos son conocidos por recuperar la viscosidad inicial tras un tiempo de reposo, por ejemplo algunas arcillas, pinturas, catsup, yogur, líquido sinovial y algunos geles. Contrario a éstos se encuentran los fluidos reopéticos pues su viscosidad aumenta con el tiempo y con la deformación aplicada. Los fluidos que recuperan parcialmente su forma original al cesar el esfuerzo cortante se denominan como viscoelásticos.

## 2.2. Modelo de viscosidad con dependencia de temperatura

Como se comentó anteriormente, la viscosidad depende de la temperatura. Dicha dependencia para sustancias puras es representada en términos generales por la ecuación de Arrhenius, ec.2.9

$$\eta(T) = A \exp^{B/T}$$

donde T es la temperatura absoluta mientras que A y B son constantes particulares de cada líquido. Los autores Cheng (2008) propusieron una ecuación en la que toman dos viscosidades de elementos puros para calcular la viscosidad de la mezcla con un intervalo de temperatura desde 0°C hasta 100°C. La ecuación fue propuesta para la mezcla de glicerina con agua, descrita a continuación

$$\mu = \mu_w^\alpha \mu_g^{1-\alpha} \quad (2.15)$$



donde  $w$  y  $g$  denotan agua y glicerina, respectivamente y  $\alpha$  es un factor de ponderación que varía entre 0 a 1, dicho factor se determina con base en la concentración en masa de la glicerina y dos coeficientes,  $a$  y  $b$ ,

$$\alpha = 1 - C_m + \frac{abC_m(1 - C_m)}{aC_m + b(1 - C_m)} \quad (2.16)$$

donde los coeficientes  $a$  y  $b$  varían con respecto a la temperatura de la mezcla con un intervalo de temperatura entre  $0^\circ\text{C}$  hasta  $100^\circ\text{C}$

$$a = 0.705 - 0.0017T \quad (2.17)$$

$$b = (4.9 + 0.036T)a^{2.5} \quad (2.18)$$

Las viscosidades del agua y la glicerina se determinan con la temperatura de la mezcla en el intervalo  $0^\circ\text{C}$  a  $10^\circ\text{C}$

$$\mu_w = 1.790 \exp\left(\frac{(-1230 - T)T}{36100 + 360T}\right) \quad (2.19)$$

$$\mu_g = 12100 \exp\left(\frac{(-1233 + T)T}{9900 + 70T}\right) \quad (2.20)$$

Las viscosidades de glicerina y agua tienen unidades de cP o  $0.001\text{Ns}/\text{m}^2$  y  $T$  es en  $^\circ\text{C}$ , los resultados muestran un error máximo de 3.5 % comparados con los datos de viscosidad de Segur & Oberstar (1951).

### 2.3. Conductividad térmica de emulsión binaria

La conductividad térmica binaria de líquidos suele ser inferior a la predicha basados en promedios molares o de fracción de peso aunque las desviaciones suelen ser pequeñas. Se han propuesto muchos métodos de correlación (Arikol y Guériéz, 1992; Assael, et al., 1992a, 1996; Bleazard y Teja, 1996; Fareleira, et al., 1990) y existe una cantidad sorprendentemente grande de datos de mezclas experimentales (Baroncini, y col., 1984; Cai, y col., 1993; DiGuilio, 1990; Gaitonde, y col., 1978; Jamieson, y col., 1969, 1973; Jamieson). e Irving, 1973; Ogiwara, et al., 1980, 1982; Qun Fung et al., 1997; Rabenovish, 1971; Shroff, 1968; Stephan y Hildwein, 1987; Teja y Tardieu, 1988; Usmanov y Salikov, 1977; Vesovic y Wakeham, 1991), Es importante resaltar que la mayoría de las investigaciones se han realizado a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, Poling et al. (2001).

De los diferentes métodos que existen para estimar la conductividad térmica, en este trabajo se utilizó la ecuación de Filippov (Filippov, 1955; Filippov and Novoselova, 1955), utiliza la fracción en peso de los componentes y la conductividad térmica de cada componente

$$\lambda_m = w_1\lambda_1 + w_2\lambda_2 - 0.72w_1w_2(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2.21)$$

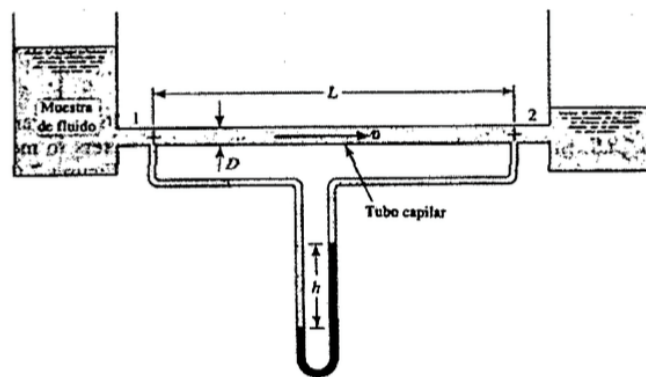
donde  $w_1$  y  $w_2$  so las fracciones de peso de los componentes,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son las conductividades térmicas de los componentes puros. Los componentes de distinguen con la condición  $\lambda_2 \geq \lambda_1$ . La constante 0.72 puede ser remplazada por un parámetro ajustable si la información de la mezcla lo proporciona. Esta técnica no se ajusta para mezclas multi-componentes pero ha sido probada para pruebas binarias, Poling et al. (2001).

Más métodos del cálculo para la conductividad térmica de mezclas binarias son expuestas en el Apéndice B.1

## 2.4. Métodos para medición de viscosidad

Los procedimientos y equipo para medir la viscosidad son numerosos. Algunos utilizan principios de la mecánica de fluidos para expresar la viscosidad en sus unidades fundamentales, mientras que otros indican sólo valores relativos de la viscosidad para comparar fluidos diferentes. En esta sección se mencionan los métodos más comunes.

- Viscosímetro de tubo capilar: Poiseuille estudió problemas de flujo capilar para entender mejor la circulación de la sangre a través de los vasos capilares en el cuerpo humano. Descubrió la relación (conocida como la ley de Hagen-Poiseuille) entre la velocidad de flujo y la caída de presión para un flujo capilar.



**Figura 2.4:** Viscosímetro de tubo capilar (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006))

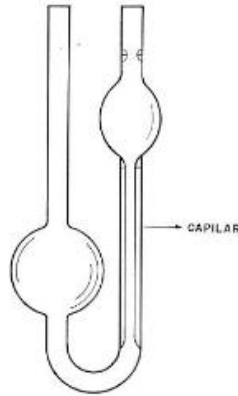
En la Fig.2.4, se muestran dos recipientes conectados por un tubo largo de diámetro pequeño, conocido como tubo capilar. Conforme el fluido fluye a través de tubo con una velocidad constante, el sistema pierde algo de energía, ocasionando una caída de presión que puede ser medida utilizando un manómetro. La magnitud de la caída de presión está relacionada con la viscosidad del fluido mediante la siguiente ecuación

$$\Delta p = \frac{32\mu v L}{D^2}$$

donde  $\Delta p$  es la diferencia de presión entre los puntos 1 y 2,  $\mu$  es la viscosidad dinámica en  $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ ,  $L$  es la longitud del tubo entre los puntos 1 y 2 en  $[\text{m}]$ ,  $v$  es la velocidad del fluido en  $\text{m/s}$  y  $D$  es el diámetro interior del tubo  $[\text{m}]$ .

Los tipos de viscosímetros capilares más comunes, y sus modos de operación son: Viscosímetro de Ostwald, Ubbelohde, Viscosímetro de rutina Cannon- Fenske.

- Viscosímetro de Ostwald: en esencia es un tubo U. Una de sus ramas es un tubo capilar finito conectado a un depósito superior. El tubo se mantiene en posición vertical y se coloca una cantidad conocida del fluido en el depósito superior Fig. 2.5



**Figura 2.5:** viscosímetro de Ostwald (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006))

En éste método se realiza una medición del tiempo requerido para que el fluido (comúnmente aceite) se transporte por un tubo capilar de longitud y diámetros conocidos, bajo una diferencia de presión que debe ser medida y constante. Éste método es gobernado por la ecuación de Hagen-Poiseuille,

$$\mu = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8VL}$$

Sí el fluido fluye únicamente por acción de la gravedad en un tubo en posición vertical, entonces la presión  $p$  se describe como  $p = \rho gh$  y la ecuación de Hagen-Poiseuille se describe como

$$\mu = \frac{\pi \rho g h r^4 t}{8VL}$$

las constantes pueden agruparse en la constante del viscosímetro

$$k = \frac{\pi r^4 g h}{8VL}$$

donde  $V$  es el volumen del líquido que fluye a través del tubo capilar en  $m^3$  de radio  $r$  y  $g$  es la aceleración gravitatoria. La altura promedio de la columna del líquido en el viscosímetro durante la medición se denota como  $h$ , y  $L$  es la longitud del tubo capilar en m. Con esta modificación la ecuación de Hagen-Poiseuille se expresa de la siguiente manera  $\mu = k \rho t$  en  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ . Por lo tanto se puede determinar de manera experimental la viscosidad cinemática de un líquido teniendo a la constante del viscosímetro  $k$  como el factor relevante que depende de la geometría de cada viscosímetro .

- Viscosímetro Ubbelohde: se utiliza para determinar las viscosidades cinemáticas de líquidos transparentes newtonianos y lubricantes hidráulicos. Con este instrumento se elimina el efecto de tensión superficial a la salida del tubo capilar. Este tipo de viscosímetro no es recomendado para realizar estudios reológicos detallados de fluidos no-newtonianos debido a que la velocidad de corte de la cual depende es limitada y no uniforme.



**Figura 2.6:** Diagrama de viscosímetro Ubbelohde (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006))

Este viscosímetro, al igual que el viscosímetro de Ostwald, obedece la ecuación de Hagen-Poiseuille

$$\mu = k\rho t$$

recordando que la viscosidad cinemática es  $\nu = \mu/\rho$ , entonces

$$\nu = kt$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática en  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ,  $k$  la constante del viscosímetro y  $t$  el tiempo en que el fluido cae de la marca superior a la marca inferior.

- Viscosímetro de orificio o viscosímetro de copa: se emplea normalmente para medir y controlar las propiedades de flujo en manufactura, procesamiento y aplicaciones de tintas, pinturas y adhesivos. Se distinguen en ser sencillos y de fácil manejo, sin embargo presentan inconvenientes en la precisión de la viscosidad. Ejemplos de este tipo de viscosímetro son Ford, Zahn, Shell, Saybolt y Furol.

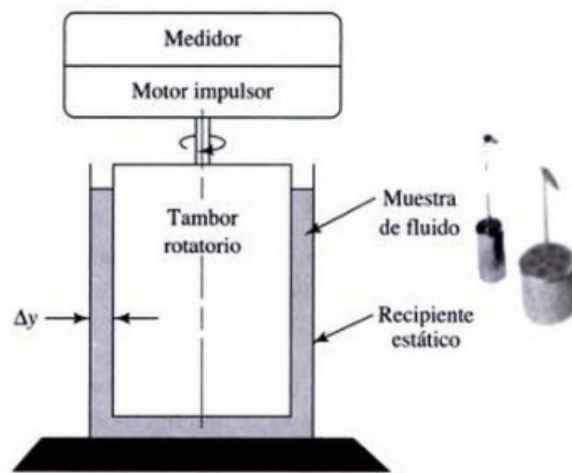
Este tipo de viscosímetro tienen normalmente capilares muy cortos, el procedimiento consiste en llenar la copa y medir el tiempo hasta que la copa quede vacía. Este método no es utilizado para fluidos no newtonianos, tixotrópicos o reopéticos.

Para calcular la viscosidad cinemática a partir del tiempo medido, se utiliza la siguiente ecuación

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = kt - \frac{K}{t}$$

donde  $k$  y  $K$  son constantes características del viscosímetro.

- Viscosímetro rotatorio: con este instrumento se utiliza el par de un eje rotatorio para medir la resistencia al flujo del fluido. En la figura 2.8 se muestran los componentes de un viscosímetro de cilindros concéntricos.

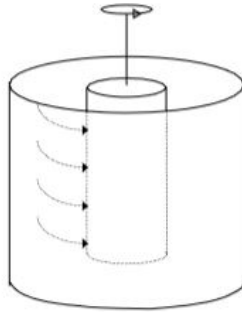


**Figura 2.7:** Esquema de los componentes de un viscosímetro rotatorio de cilindros concéntricos (Imagen tomada a partir de Mott & Brito (2006))

Existen varios tipos de viscosímetros rotatorios, que trabajan con flujos de corte simples, para tales instrumentos, los métodos para inducir el flujo son dos: uno lo puede conducir el flujo y medir el par resultante o bien aplicar un par y medir la tasa de rotación. Estos métodos fueron establecidos durante la primera guerra mundial el primero por Couette en 1888 y el segundo por Searle en 1912.

Hay dos maneras de aplicar la rotación y medir el par: se puede poner en movimiento el disco y medir el par en el mismo elemento, o mover un elemento y medir el par en el otro elemento.

Un viscosímetro de cilindros concéntricos desarrolla un flujo de Couette provocado por el flujo entre los cilindros concéntricos



**Figura 2.8:** Flujo de Couette en un viscosímetro de cilindros concéntricos (Imagen tomada a partir de Barnes et al. (1989))

Un viscosímetro de este tipo cumple con la ecuación para un radio dado Barnes et al. (1989)

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{2w R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de deformación,  $\frac{d\gamma}{dt}$  la velocidad de deformación,  $M$  el par de fuerzas aplicado por unidad de longitud del cilindro sumergido en el fluido,  $w = 2\pi/60N$  donde  $N$  es la velocidad angular en rpm,  $R_c$  el radio del contenedor de la muestra,  $R_b$  el radio del cuerpo de giro y  $x$  la distancia donde se desea determinar el punto de cizalla.

Los equipos se diseñan de manera en que la distancia entre los dos cilindros sea lo suficientemente pequeña para que la velocidad de deformación sea aproximadamente constante a lo largo del espacio anular, al igual que el esfuerzo de deformación, de forma que para un radio medio  $R_a$ , Barnes et al. (1989)

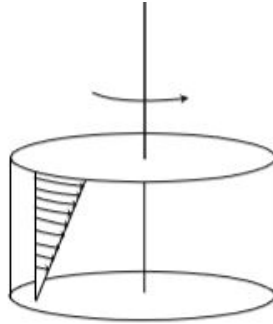
$$\tau = \frac{M}{2\pi R_a^2}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{R_{ai}^2}{(R_2 - R_1)} w$$

Éste ensayo produce tres magnitudes: el gradiente de velocidad  $\Delta v/\Delta y$  que proporciona la velocidad, el esfuerzo de cizalla medido proporcional al par de torsión y la temperatura  $T$  medida con preferencia directamente del fluido.

El medidor detecta el arrastre e indica la viscosidad a una pantalla analógica o digital. Este viscosímetro se utiliza para fluidos muy variados como pintura, tinta, comida, derivados del petróleo, cosméticos y adhesivos.

- El viscosímetro de placas paralelas contiene el fluido entre las placas, la placa superior gira y la inferior permanece inmóvil. Los elementos de la placa móvil tendrán una velocidad superior a la que los que se encuentran próximos a la placa fija. Estos equipos son fáciles de limpiar y requieren pequeñas cantidades de muestra, la desventaja es que la velocidad de cizalla cambia de acuerdo a la distancia al centro de la placa.



**Figura 2.9:** Representación de un viscosímetro de placas paralelas (Imagen tomada a partir de Barnes et al. (1989))

Se puede calcular la velocidad de cizalla máxima y la viscosidad mediante, Barnes et al. (1989):

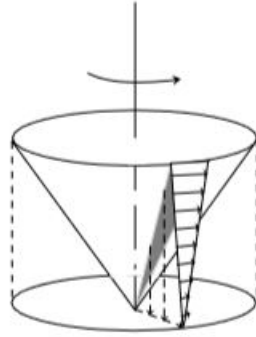
$$\dot{\gamma}_m = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{\Omega}{l}R$$

$$\eta = \frac{3M}{2\pi R^3(\dot{\gamma}_m) \left[ 1 + 3\frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}} \right]}$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de deformación,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación,  $R$  es el radio de la placa,  $l$  la distancia entre placas,  $M$  el par de fuerzas aplicado,  $\Omega$  la velocidad de giro y  $\eta$  la viscosidad aparente.

- El viscosímetro de cono-placa, a diferencia de los viscosímetros de cilindros coaxiales el viscosímetro de cono-placa no presenta una distribución compleja de fatiga de cizalla y velocidad de deformación en cizalla. Su funcionamiento se basa en la cizalla presente en un líquido situado en el espacio comprendido entre un cono y una placa, siendo el ángulo entre el cono y la placa,  $(\alpha)$  muy pequeño (inferior a  $4^\circ$ ).





**Figura 2.10:** Representación de forma exagerada de un viscosímetro de cono-placa (Imagen tomada a partir de Barnes et al. (1989))

Si el cono gira con cierta velocidad angular ( $\Omega$ ), se generará un movimiento de rotación en el fluido de tal forma que éste girará a una velocidad mayor cerca de las paredes del cono. Este tipo de viscosímetro utiliza muestras pequeñas y comparando con los otros viscosímetros en los que la velocidad de cizalla cambia con la distancia al centro de rotación. Sin embargo la velocidad de cizalla a lo largo del espaciado del cono es constante. Para fluidos no newtonianos no es necesario realizar correcciones, siendo posible para fluidos newtonianos

$$\eta = \frac{3\alpha M}{2R_c^3}$$

$$\tau = \frac{2M}{2\pi R_c^3}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha}$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de deformación,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación,  $R_c$  es el radio del cono,  $M$  el par de fuerzas aplicado,  $\Omega$  la velocidad angular del cono y  $\alpha$  el ángulo del cono.

# Capítulo 3

## EXPERIMENTOS

Con el fin de obtener resultados de viscosidad dinámica para diluciones de glicerina y agua desde 50 %wt hasta 100 %wt, con un aumento de 10 %wt entre cada emulsión, dentro de un intervalo de temperatura de 20°C hasta 60°C, se realizaron pruebas de viscosidad en un viscosímetro rotacional, Brookfield DV2T Viscosimeter. A continuación se describe la metodología.

### 3.1. Aparato experimental

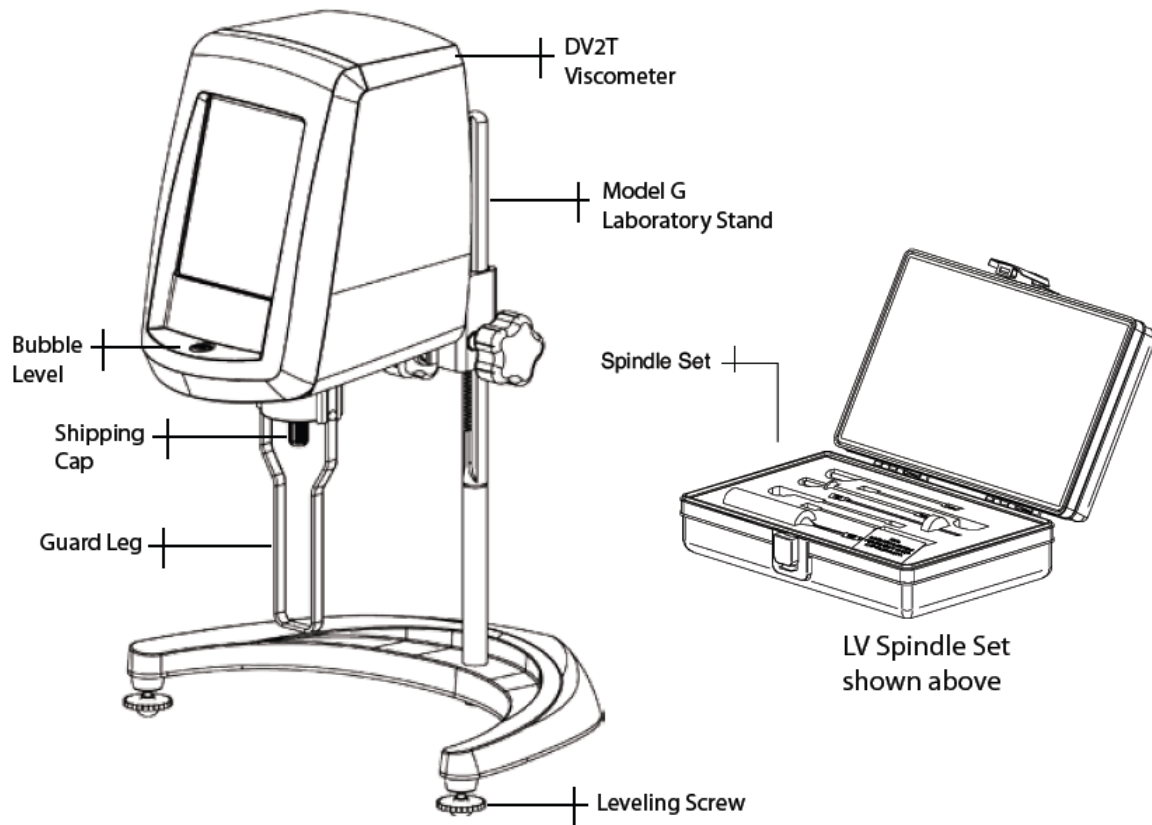
El viscosímetro Brookfield DV2T, es un viscosímetro rotacional en el que se produce un flujo tipo Couette. Este viscosímetro cuenta con agujas de medición las cuales se utilizan dependiendo de la sustancia. En las pruebas de 50 % wt hasta 90 % de glicerina se utilizó UL adapter para poder registrar los datos.

El cilindro contenedor de UL adapter Fig. 3.3 tiene capacidad de 16 ml de la sustancia a prueba, puede medir desde 1 cP a 10 cP con una tasa de corte de 73.4 1/s a una velocidad de 60 RPM. El adaptador UL puede tener un baño de temperatura controlada hasta de 100 °C con la camisa que provee el mismo kit.

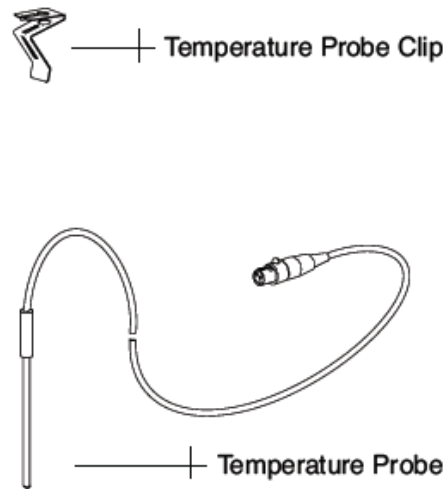
Es importante mencionar que este adaptador tiene la limitante de que el termopar que incluye el viscosímetro no uede ser introducido a la sustancia mientras se realiza la prueba. Es por eso que se decidió realizar un baño térmico con un vaso precipitado y definir que la

temperatura del agua que funciona como baño térmico será casi igual a temperatura de la dilución en prueba.

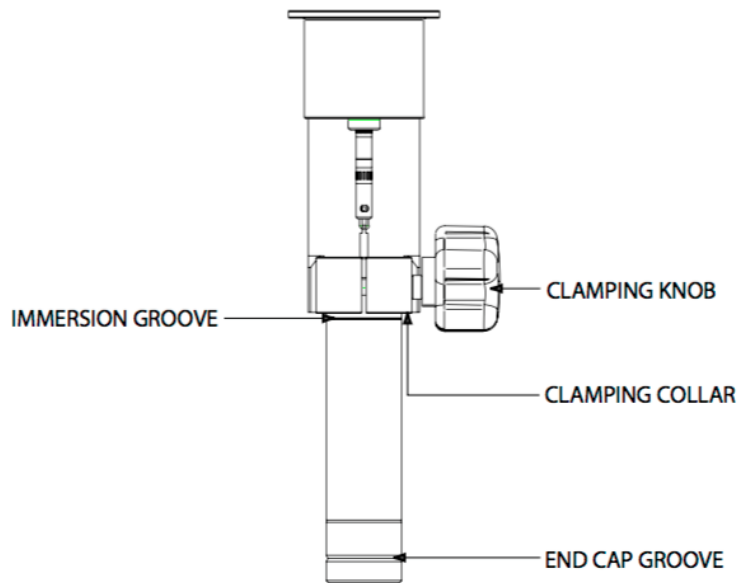
Las agujas utilizadas fueron #0 UL Adapter y #61 LV para un intervalo de viscosidad de 5 cP a 1500 cP dependiendo de la proporción utilizada en la emulsión.



**Figura 3.1:** Componentes Brookfield Viscosimeter DV2T: Viscosímetro Brookfield DV2T, kit de agujas de medición (Imagen tomada a partir de Brookfield DV2T Manual No. M13-167-B0614 BRO (n.d. a))



**Figura 3.2:** Componentes Brookfield Viscosimeter DV2T: Termopar y clip (Imagen tomada a partir de Brookfield DV2T Manual No. M13-167-B0614 BRO (n.d. a))



**Figura 3.3:** Componentes Brookfield Viscosimeter DV2T: Adaptador UL (Imagen tomada a partir de Brookfield Enhanced UL Adapter Assembly & Operating Instruction BRO (n.d. b))



**Figura 3.4:** Parrilla Thermo Scientific SuperNuova+ Ceramic Digital (Imagen tomada a partir de ML MCQUEEN Laboratory Supply Supply (n.d.))



**Figura 3.5:** Fotografía del viscosímetro Brookfield DV2T



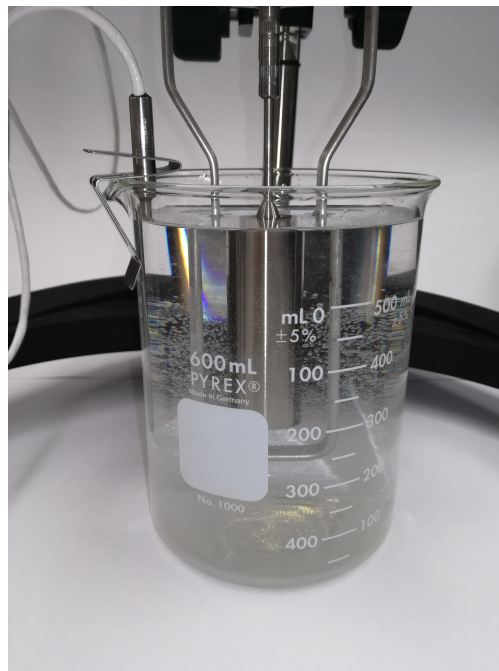
**Figura 3.6:** Fotografía de aguja del adaptador UL Brookfield



**Figura 3.7:** Fotografía de ensamble del adaptador UL Brookfield para realizar prueba de viscosidad, el adaptador se encuentra sumergido en agua que proporciona el baño térmico requerido



**Figura 3.8:** Fotografía de prueba con aguja# 61 para glicerina pura en viscosímetro Brookfield DV2T



**Figura 3.9:** Acecamiento de fotografía de prueba con aguja# 61 para glicerina pura en viscosímetro Brookfield DV2T

## 3.2. Matriz de experimentos

En esta matriz se representan los experimentos que se realizaron para obtener la viscosidad dinámica de las diferentes diluciones de glicerina con agua. Cada experimento se realizó al menos 5 veces con el fin de verificar el resultado al comparar con los datos reportados por Segur & Oberstar (1951). Las diluciones fueron realizadas el mismo día en el que se realizaba la prueba para evitar que las condiciones del lugar afectaran la calidad de la muestra. Cada prueba tiene una duración aproximada de 25 minutos.

Temperatura °C	Glicerina % wt					
	50	60	70	80	90	100
20	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
30	4.7	4.8	4.9	4.10	4.11	4.12
40	–	–	–	–	–	–
50	–	–	–	–	–	–
60	–	–	–	–	–	–

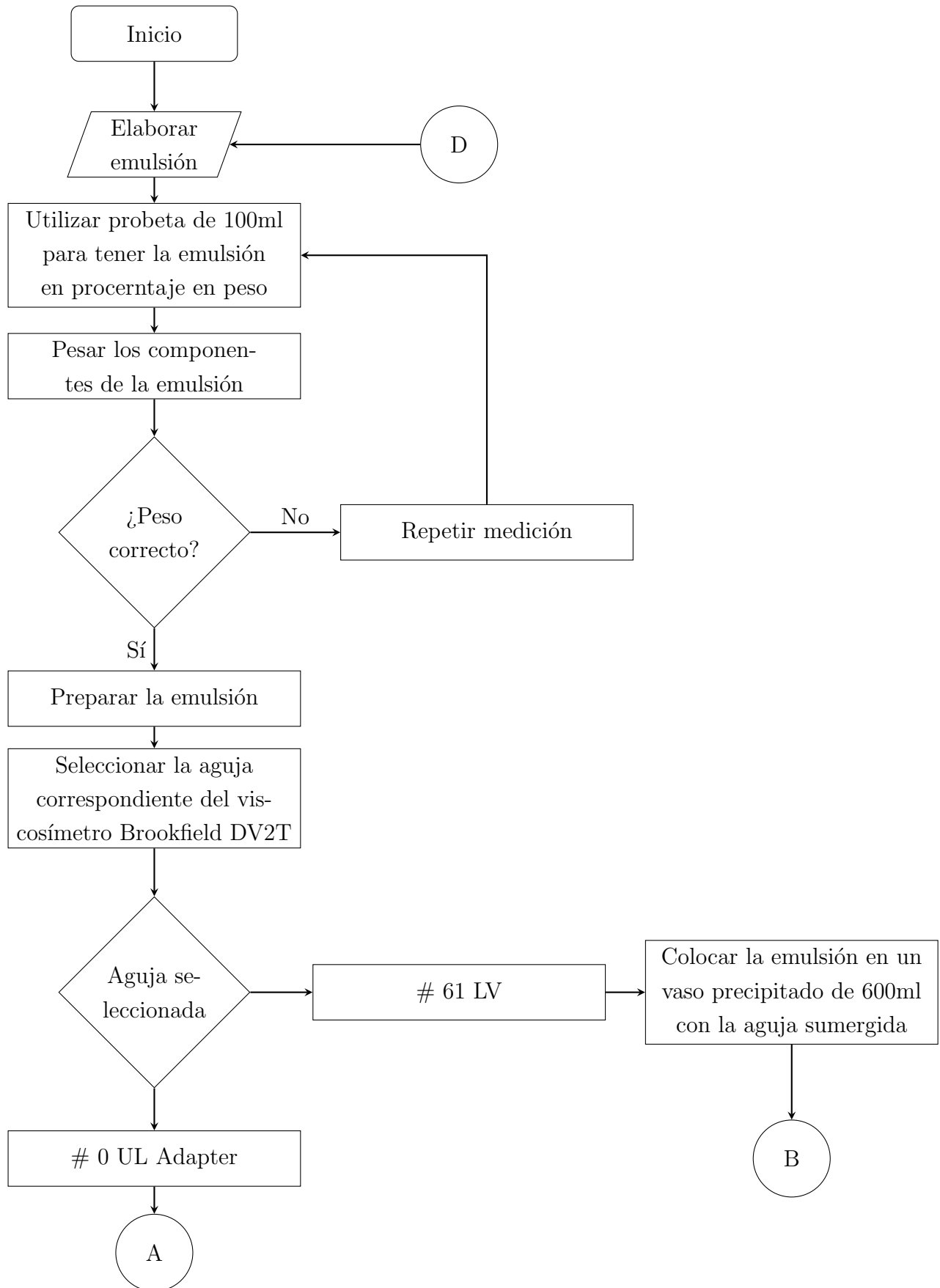
**Tabla 3.1:** Matriz de experimentos, dentro de algunas casillas se encuentra la etiqueta de las gráficas correspondientes.

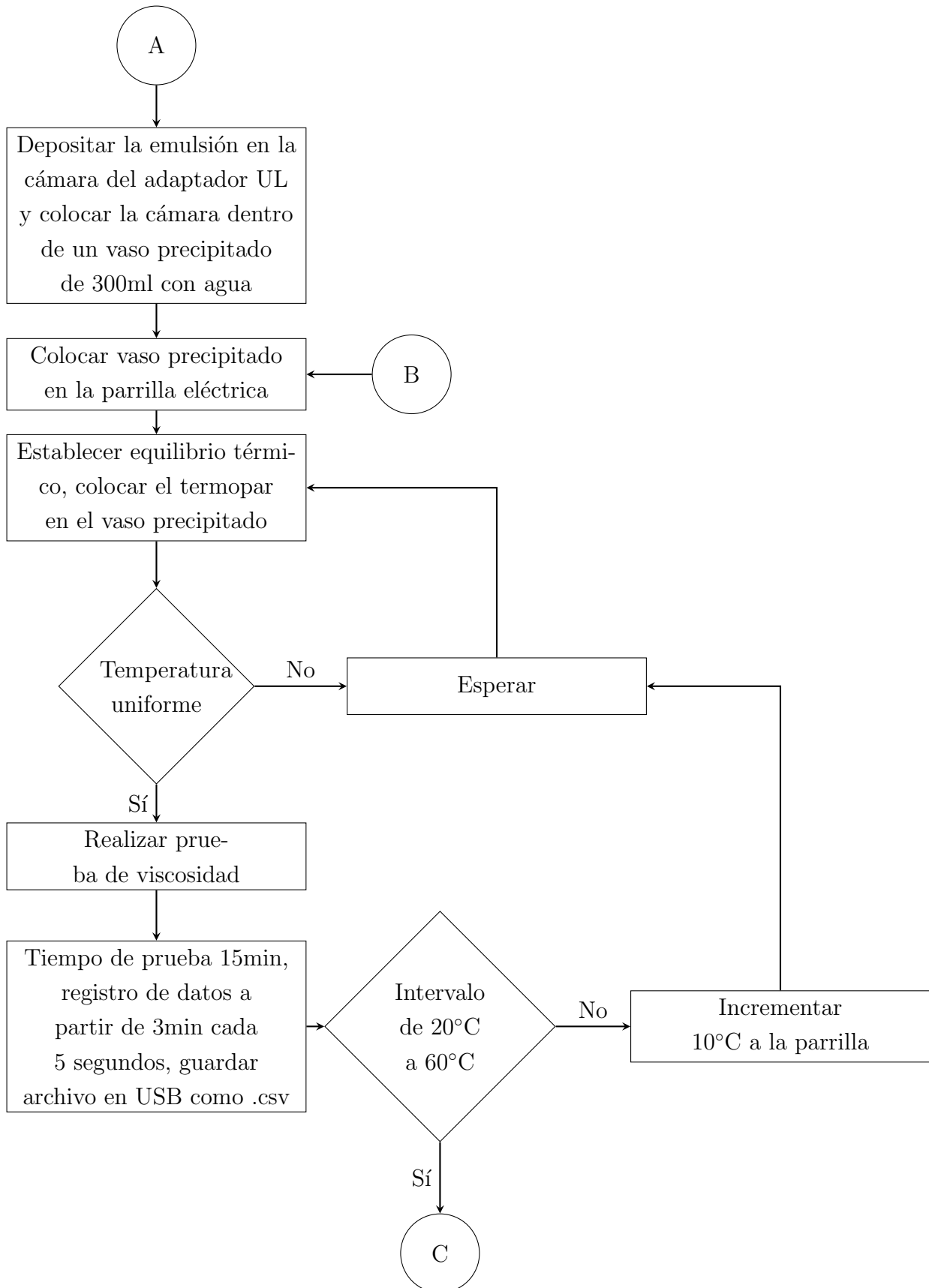
## 3.3. Propuesta de metodología de medición

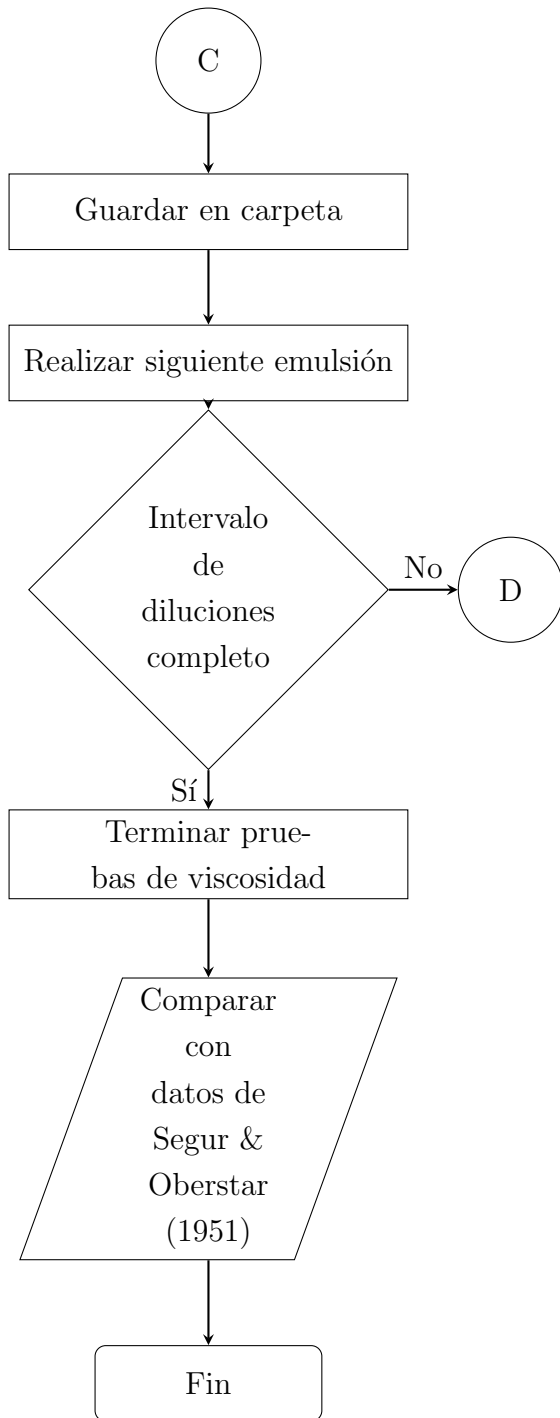
Se sabe que la viscosidad se puede reducir mediante tres mecanismos fundamentales, térmico, químico y mecánico. En este trabajo se analiza el mecanismo térmico. Para realizar la evaluación del desempeño de cualquier sustancia es importante conocer los elementos que la componen, en este caso se trata de la emulsión de glicerina con agua, es importante controlar que la proporción de cada elemento sea lo más exacta posible, de lo contrario los resultados reflejarán ese error.

Con este propósito se realizó el siguiente diagrama de flujo indicando paso a paso las acciones que se deben realizar para tener una prueba de viscosidad satisfactoria. Se debe contemplar que las pruebas deben realizarse en un lugar cerrado, sin cambios de temperatura y que el laboratorista sea el mismo en cada prueba.









1. **Preparar la emulsión en porcentaje de peso.** Para obtener la cantidad exacta de glicerina se debe utilizar una probeta de 100[ml] donde se deposita el porcentaje de glicerina correspondiente a la emulsión, al igual que en otra probeta diferente se deposita el porcentaje de agua. Para después mezclar en un vaso precipitado con ayuda

de un agitador magnético durante 10 minutos.

2. **Equilibrio térmico.** Se debe aumentar la temperatura de las piezas del adaptador UL, esto con un baño térmico con ayuda de una parrilla eléctrica, en un vaso precipitado de 400 [ml] colocar el adaptador UL por separado, cilindro con la emulsión y la aguja, sumergidos en agua con el propósito de obtener equilibrio térmico. Al lograr éste equilibrio térmico se debe colocar la aguja dentro del cilindro, se debe recordar que el cilindro siempre debe permanecer en el vaso precipitado para mantener el efecto del baño térmico.
3. **Ajustar viscosímetro.** Colocar el adaptador UL en la base del viscosímetro se deben insertar los datos de RPM, número de aguja, tiempo de prueba (15 minutos), intervalo de adquisición de datos (a partir del tercer minuto se registra cada 5 segundos) en la interfaz del viscosímetro.
4. **Registro de datos.** Guardar los datos en un archivo con extensión .csv para poder abrir y manejar los datos en hojas de cálculo.
5. **Ajustar temperatura.** Aumentar 10°C a la parrilla, esperar de 15 a 20 minutos para obtener el equilibrio térmico, repetir el paso 2 y 3 hasta llegar a los 60°C con cada emulsión elaborada, con excepción de 100%wt Glicerina, en ese caso se debe utilizar un vaso precipitado de 600[ml], aguja #61 LV, Brookfield Guard Leg.
6. **Hojas de cálculo.** Ordenar en hojas de cálculo los datos obtenidos desde 20°C hasta 60°C para cada emulsión. Realizar incertidumbre de datos Kline (1953), y realizar gráficas viscosidad-temperatura y comparar con gráficas reportadas por Segur & Oberstar (1951) y con el modelo propuesto por Cheng (2008).

# Capítulo 4

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados experimentales de las diferentes diluciones de glicerina y agua, a través de una serie de gráficos, que se comparan con fuentes tanto experimentales como numéricas para comprobar la veracidad de los mismos.

### 4.1. Análisis de incertidumbre

Para realizar el análisis de incertidumbre de un experimento es necesario conocer las variables que involucra el fenómeno de estudio, una vez identificados las variables se deben seleccionar los parámetros que representan un cambio significativo al ser modificados. En este trabajo se utiliza el método de Kline-McClintock para la evaluación de la incertidumbre experimental, Kline (1953).

Las pruebas realizadas para las diluciones desde 50 %wt hasta 90 %wt de glicerina fueron realizadas en el adaptador UL, Fig. 3.3. En el cual se aplican las ecuaciones

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{2R_c^2}{R_c^2 - R_b^2} \right) \omega$$

donde  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de cizalla,  $\omega = \frac{2\pi}{60}N$  es la velocidad angular,  $R_c$  es el radio del contenedor y  $R_b$  es el radio de la aguja.

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante, M es el torque dado por el instrumento (viscosímetro Brookfield),  $R_b$  es el radio de la aguja y L es la longitud efectiva de la aguja.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Las variables independientes son  $R_b$ ,  $R_c$ , L,  $\omega$  y M, de los cuales se seleccionaron  $\omega$  y M, para las demás variables se consideró que su cambio de longitud característica de éstos no sería modificada pues no podrían ser afectados por la temperatura a la que fueron expuestos durante el experimento. Quedando así la expresión:

$$\eta = \frac{M(R_c^2 - R_b^2)}{4\pi R_c^2 R_b^2 L \omega} \quad (4.1)$$

donde  $\omega$  y M son los variable a los cuales se tendrán que calcular el valor medio y su desviación estándar, Kline (1953).

$$f = \bar{f} \pm \delta f \quad (4.2)$$

donde  $f$  es el comportamiento estadístico de la variable,  $\bar{f}$  es el promedio de la variable, y  $\delta f$  es la incertidumbre de la variable, la cual se calcula por medio de:

$$\delta f = \sigma z = \left[ \frac{1}{N} \sum_1^n (f_i - \bar{f})^2 \right]^{1/2} z \quad (4.3)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar, N es el número de datos,  $f_i$  el valor -iésimo de la variable,  $\bar{f}$  el promedio de la variable, y z es el intervalo de confianza que puede ser seleccionado según el nivel de confianza que se desee, para este caso se selecciono el valor de 1.96 que nos proporciona un nivel de confianza del 95 % para los datos.

La viscosidad  $\eta$  es la variable dependiente a la que se le debe calcular su incertidumbre  $\delta\eta$  de la siguiente manera:

$$\delta\eta = \left[ \left( \frac{\partial\eta}{\partial x_1} \right)^2 \delta x_1^2 + \left( \frac{\partial\eta}{\partial x_2} \right)^2 \delta x_2^2 + \dots + \left( \frac{\partial\eta}{\partial x_n} \right)^2 \delta x_n^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

las cantidades  $\partial\eta/\partial x_i$  proveen la medida de sensibilidad de la variable  $\eta$  con respecto a las variables  $x_i$ . En este caso  $x_1$  y  $x_2$  corresponden a  $\omega$  y M, respectivamente, como se muestra a continuación:

$$\dot{\eta} = \bar{\eta} \pm \delta\eta \quad (4.5)$$

La ecuación 4.5 es la expresión utilizada para obtener la viscosidad con incertidumbre para cada grado de temperatura. En donde  $\dot{\eta}$  es la viscosidad con incertidumbre,  $\bar{\eta}$  es el valor promedio de viscosidad para cada grado de temperatura registrado<sup>1</sup>, y  $\delta\eta$  es el comportamiento estadístico de la viscosidad para cada temperatura<sup>2</sup>, expresado de la siguiente manera.

$$\delta\eta = \left[ \left( -\frac{M(R_c^2 - R_b^2)}{4\pi L R_c^2 R_b^2 \omega^2} \right)^2 \delta\omega^2 + \left( \frac{R_c^2 - R_b^2}{4\pi L \omega R_c^2 R_b^2} \right)^2 \delta M^2 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

La evaluación de incertidumbre se realizó utilizando las variables mencionadas a los datos registrados de las diluciones de glicerina y agua para cada dilución se realizó la incertidumbre para cada temperatura de la prueba, es decir desde 15°C hasta 60°C con un aumento de 1°C, en las siguientes figuras se muestran las curvas con los límites de incertidumbre, en cada inciso se muestra el resultado de incertidumbre para cada emulsión desde 50 % hasta 90 % de glicerina, la emulsión de 60 % Fig.4.2 muestra que a partir de los 35°C la incertidumbre de los datos tiende a alejarse de los datos experimentales. Para las demás diluciones el resultado de la incertidumbre se presenta muy cercano a los valores experimentales.

A continuación se muestran los datos experimentales de las diferentes diluciones dentro de los límites de incertidumbre calculados, el porcentaje mostrado se refiere al peso de glicerina.

Las diluciones muestran un comportamiento lineal en el formato semi-log pues es una función naturalmente exponencial; como se esperaba, la viscosidad decrece con el incremento de la temperatura. En la mayoría de las gráficas(4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5), se puede observar que en el intervalo de temperatura entre 35 °C y 40 °C un cambio de pendiente como si se tratara de un cambio de fluido, debo agregar que podría decirse que sí es un cambio de fluido ya que para realizar la medición de el intervalo de temperatura estipulado (desde 20 °C hasta 60 °C) era necesario realizar el experimento en dos días, el primer día se aplicaba la prueba para el intervalo entre 20 °C hasta aproximadamente 40 °C y en el segundo día se realizaba la prueba en el intervalo desde 35 °C hasta aproximadamente 60 °C.

Las diluciones se pueden comparar entre sí y se puede reconocer que la proporción de agua cambia por hasta un factor de orden 1 en los valores de la viscosidad.

---

<sup>1</sup>Para cada grado de temperatura fueron registrados aproximadamente 200 datos.

<sup>2</sup>Se utilizó la forma de la ecuación 4.3

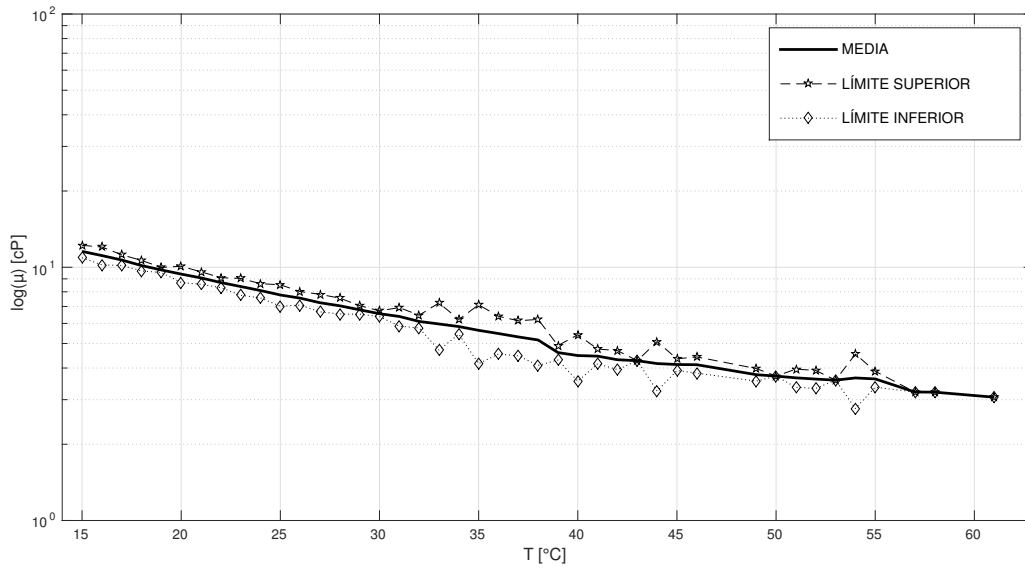


Figura 4.1: 50 %wt

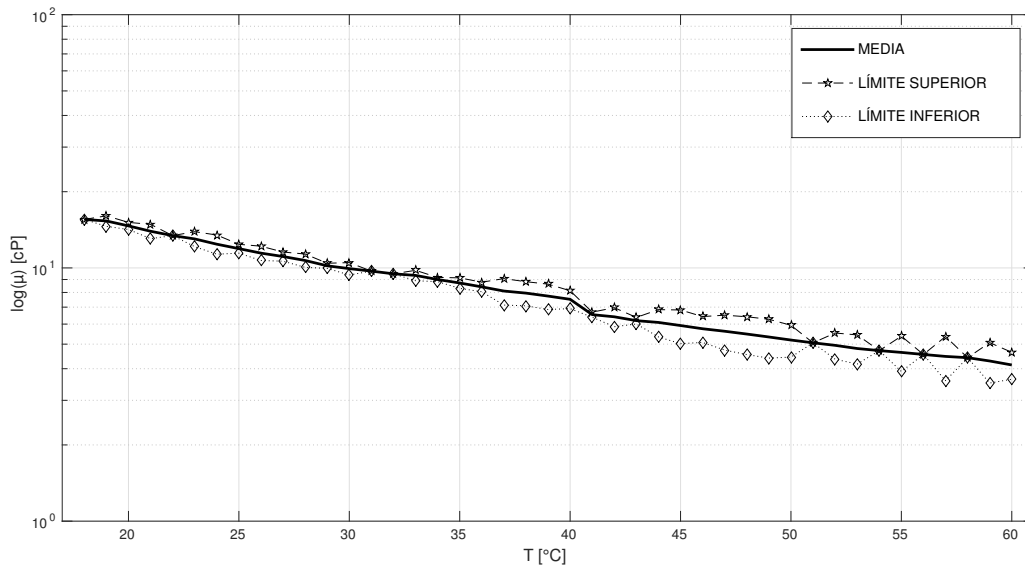


Figura 4.2: 60 %wt



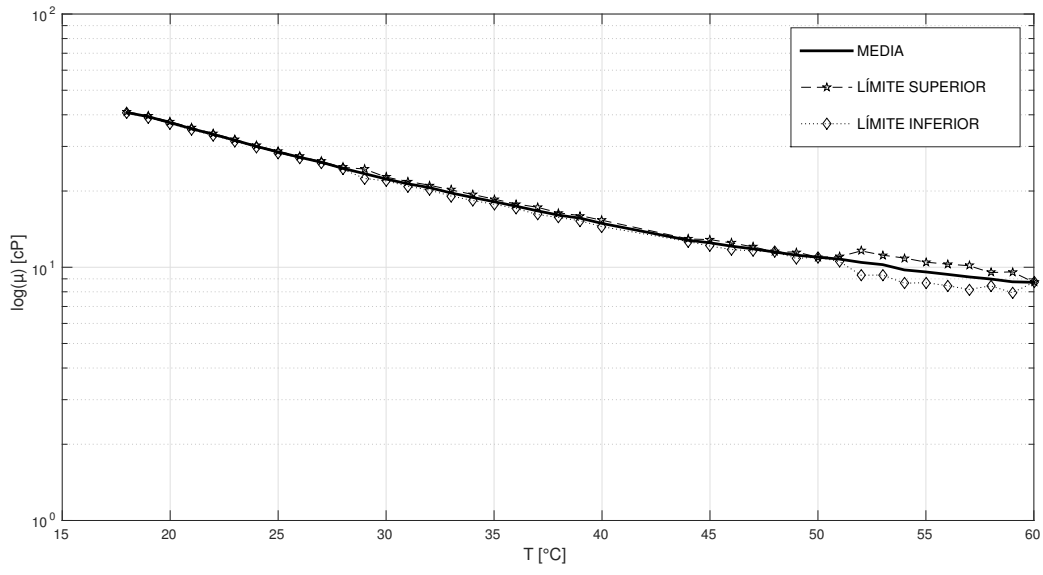


Figura 4.3: 70 %wt

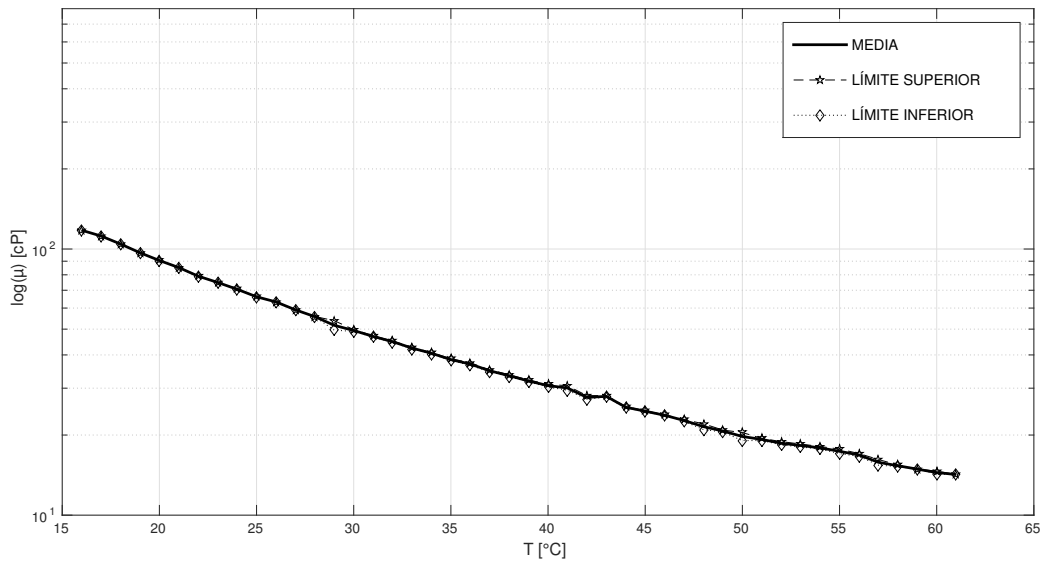


Figura 4.4: 80 %wt

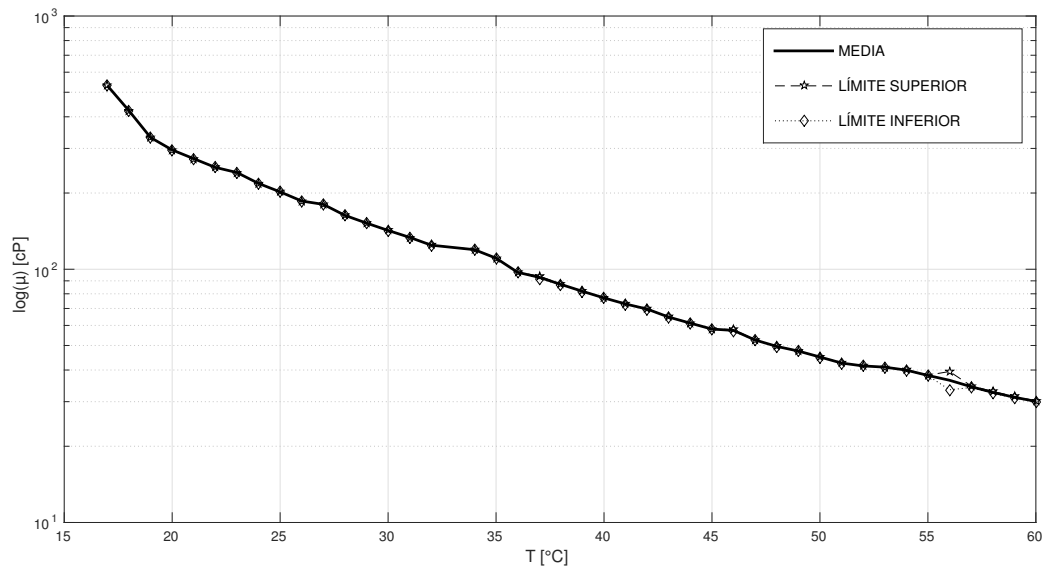


Figura 4.5: 90%wt

## 4.2. Comparación con otros datos reportados

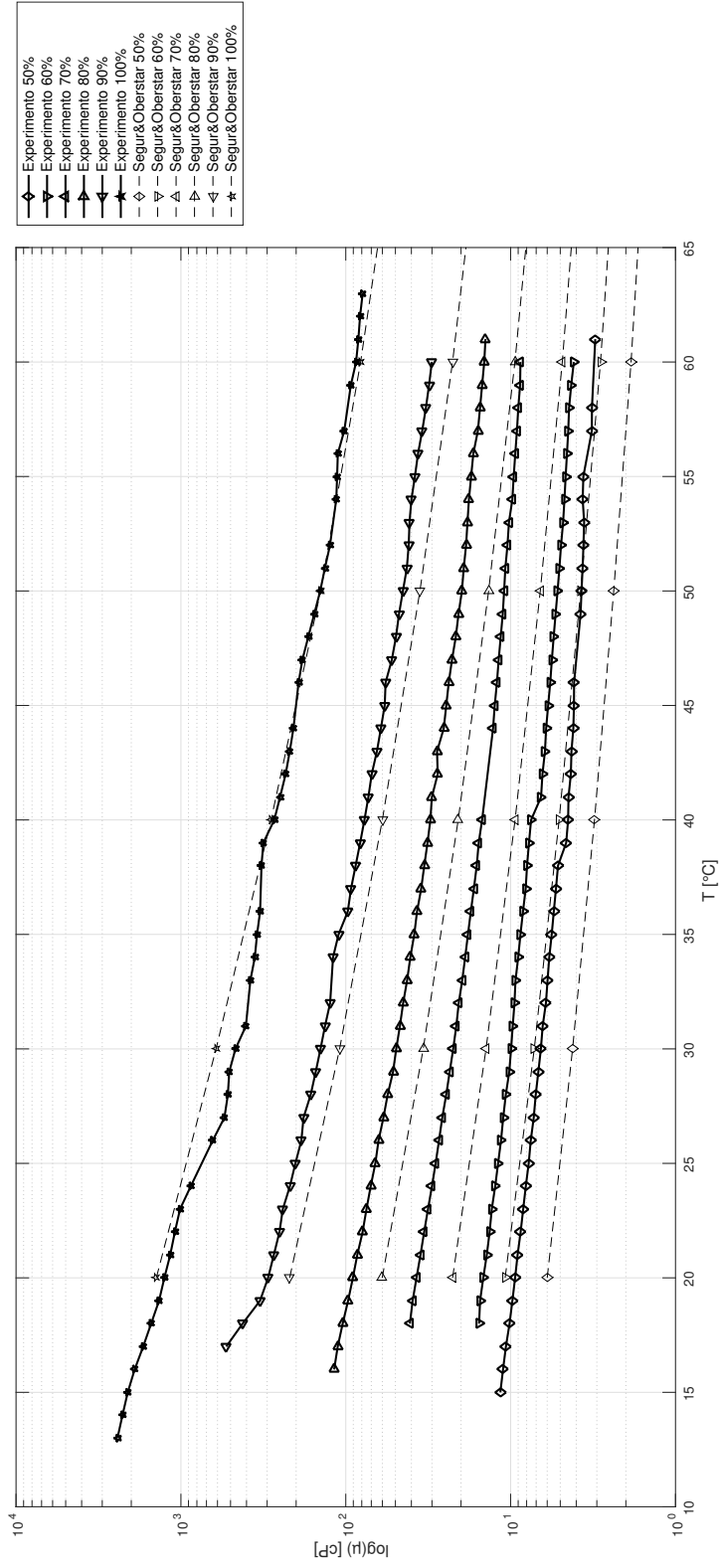
Utilizando los datos de la viscosidad con análisis de incertidumbre, se compararon con los datos reportados por Segur & Oberstar (1951)<sup>3</sup>, se obtuvo que ambos comportamientos mostraban la misma tendencia de los datos experimentales con respecto a los datos de referencia, a pesar de que en los datos experimentales se observan por encima de los valores de referencia Fig. 4.6.

Se debe recordar que el experimento fue realizado para cada dilución desde 50 % wt hasta 100 % wt de glicerina, entre un intervalo de temperatura de 20°C hasta 60°C, con ayuda de una parrilla eléctrica se realizó un baño térmico. Por ello los datos debieron tener esa diferencia en el valor de la viscosidad porque el calor total transferido de la parrilla al vaso precipitado, del vaso al agua para transferirse del agua al contenedor y del contenedor a la emulsión de glicerina y agua dejó de ser el mismo. Aún así se establece la misma tendencia de los datos.

Es importante distinguir que los datos del experimento de 100 % glicerina prácticamente son iguales a los datos reportados por Segur & Oberstar (1951), Fig. 4.6, pues su desarrollo fue diferente evitando el baño térmico, debido a que se utilizó la aguja #61 del viscosímetro DV2T Brookfield, la cual se realiza la prueba en un vaso precipitado de 600 ml, así que el vaso precipitado tuvo contacto directo con la parrilla eléctrica.

---

<sup>3</sup>Los datos reportados por Segur & Oberstar (1951) son viscosidades dinámicas experimentales, el método y descripción se menciona en la sección 1.2.1



**Figura 4.6:** Comparación de resultados experimentales con valores reportados por Segur & Oberstar (1951).

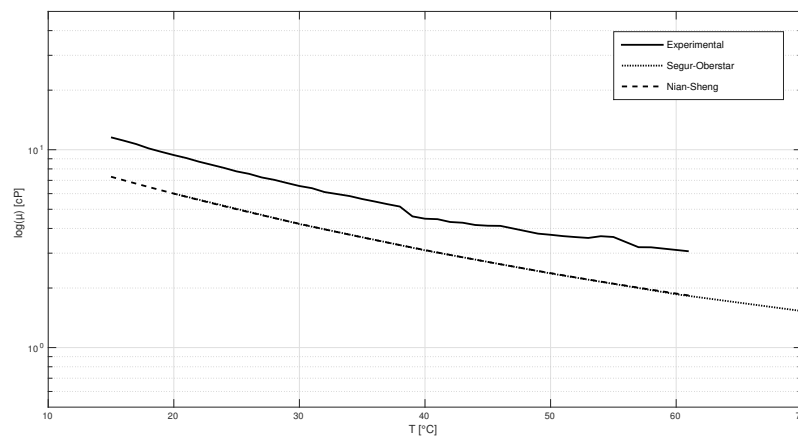
### 4.3. Validación de datos experimentales con modelo de viscosidad

Considerando la ecuación 2.15 reportada por Cheng (2008) para diluciones de glicerina con agua se utilizó para comparar los datos calculados con las temperaturas experimentales, los datos reportados por Segur & Oberstar (1951) y los datos experimentales de este trabajo

$$\mu = \mu_w^\alpha \mu_g^{1-\alpha}$$

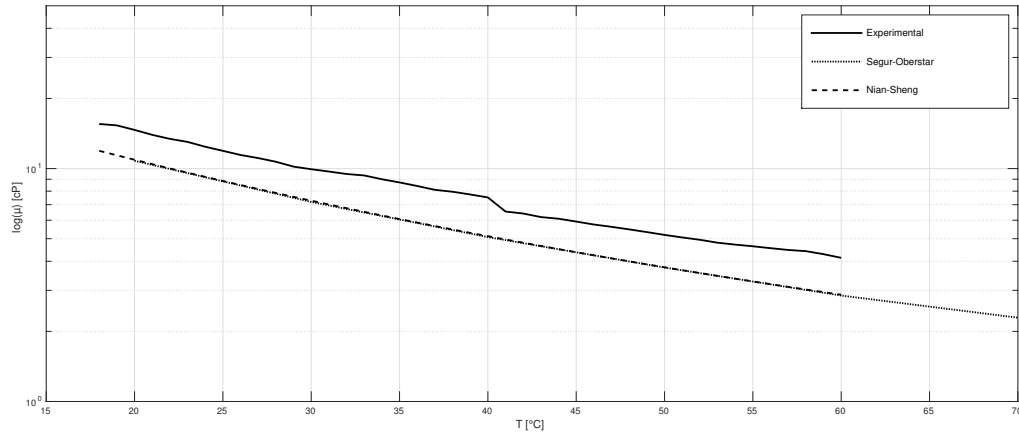
La tendencia que presentan las tres fuentes<sup>4</sup> son iguales; Para el cálculo con la ecuación 2.15 se utilizaron las temperaturas experimentales obtenidas. Con el modelo de Cheng (2008) se muestra que el resultado de los valores experimentales debieron coincidir, esto sin tomar en cuenta la pérdida de calor transferido entre la parrilla eléctrica, el baño térmico y la camisa donde se contenía la dilución.

Con el objeto de realizar predicciones más confiables de la viscosidad, se realizó una modificación de la ecuación 2.15 que se presentan en la siguiente sección.

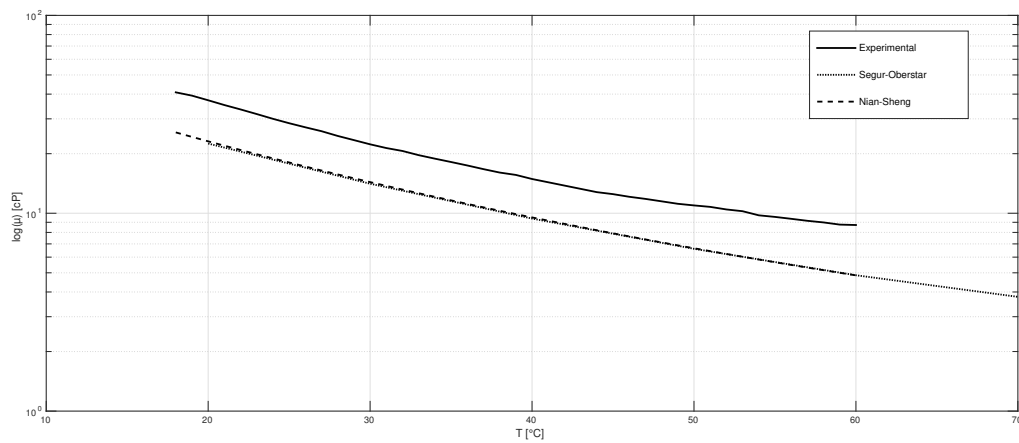


**Figura 4.7:** Comparación de resultados experimentales para 50 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951).

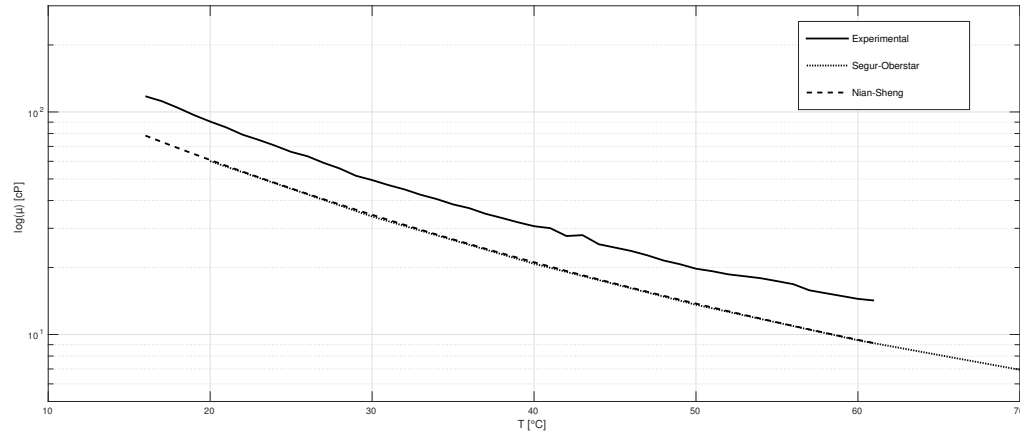
<sup>4</sup>Segur & Oberstar (1951) con sus datos experimentales, Cheng (2008) al ofrecer el modelo matemático y los datos que fueron elaborados para éste trabajo.



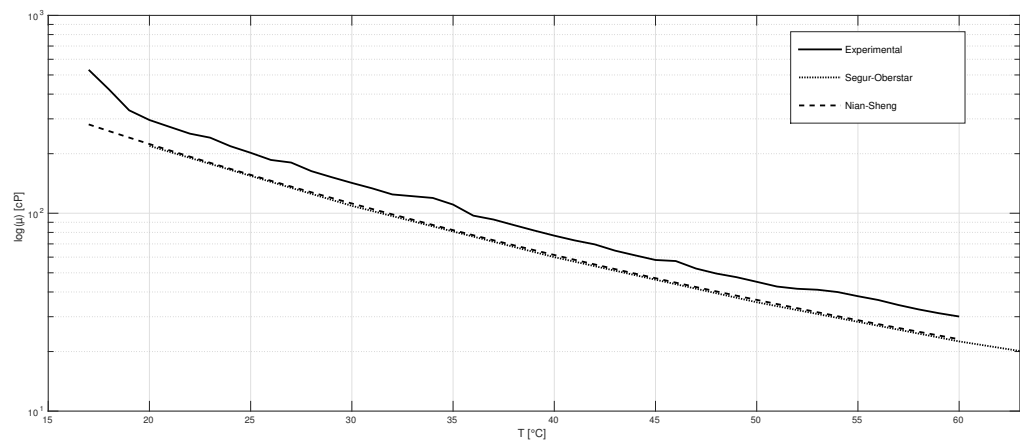
**Figura 4.8:** Comparación de resultados experimentales para 60%wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951).



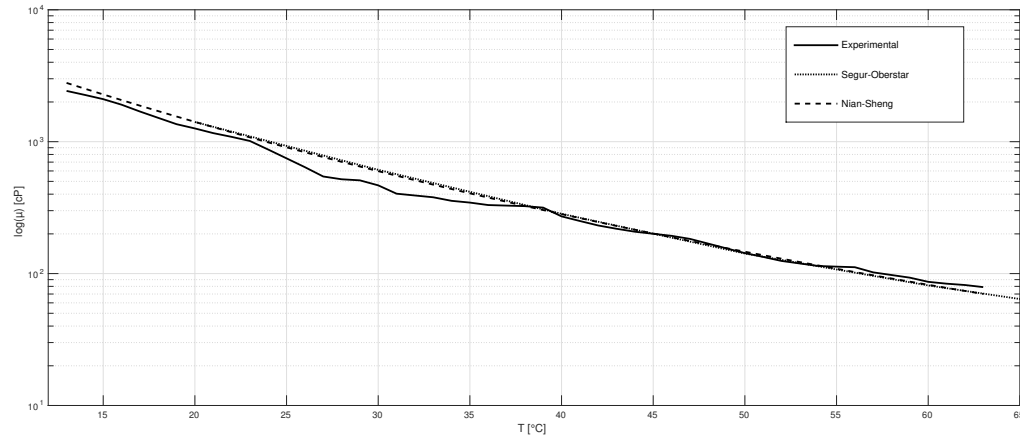
**Figura 4.9:** Comparación de resultados experimentales para 70%wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951).



**Figura 4.10:** Comparación de resultados experimentales para 80 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951).



**Figura 4.11:** Comparación de resultados experimentales para 90 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951).



**Figura 4.12:** Comparación de resultados experimentales para 100 %wt de glicerina, con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951).

#### 4.4. Conductividad térmica de la emulsión binaria

La proporción en peso de agua en cada dilución afecta la transferencia de calor, esto quiere decir que si la dilución contiene agua su conductividad térmica aumentará, facilitando el flujo de calor en el fluido. Por otra parte se dispararía el incremento de temperatura pues el efecto de disipación viscosa<sup>5</sup> modifica y evita el control de temperatura en el fluido.

Para determinar la conductividad térmica de cada dilución binaria, se utilizó la ecuación de Filippov 2.21 (mencionado en la subsección 2.3); y tomando los datos de conductividad térmica de la dilución glicerina con agua reportados por Segur & Oberstar (1951) se pudo hacer una comparación entre ambos<sup>6</sup>.

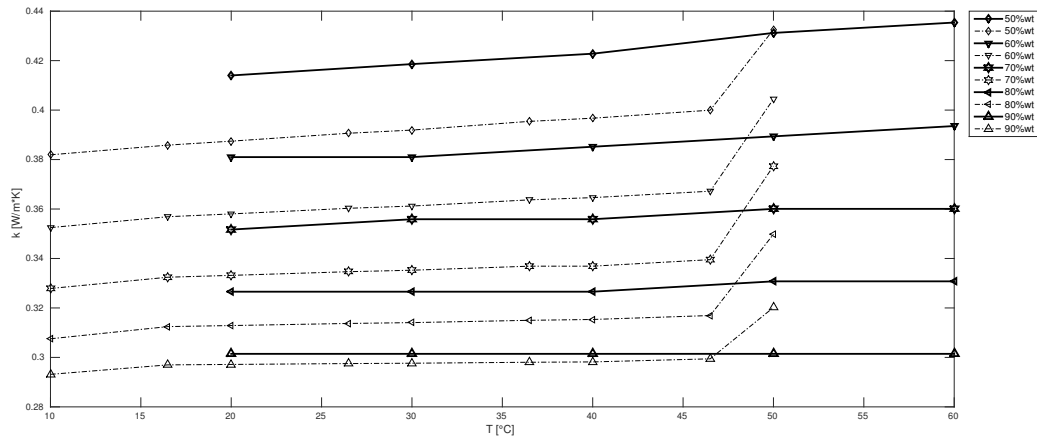
Al utilizar la ecuación 2.21 se tomaron las fracciones de peso desde 50 % hasta 90 % y la conductividad térmica de la glicerina y agua reportados en Incropera & DeWitt (1999), y con un intervalo de temperatura fue desde 10 °C hasta 50 °C para ambos componentes de la emulsión. Como se puede observar en la Fig. 4.13 dónde se compran los datos calculados con los reportados por Segur & Oberstar (1951), que la conductividad térmica de las diluciones tienen un decremento cuando el porcentaje en peso de glicerina incrementa. Las pruebas

<sup>5</sup>La disipación viscosa se puede observar cuando un fluido se pone a prueba en un viscosímetro y durante la prueba el fluido aumenta la temperatura generando entropía.

<sup>6</sup>El cálculo con la ecuación de Filippov y los datos de conductividad térmica de Segur & Oberstar (1951)



realizadas con baño térmico tienen un registro de temperatura diferente a la temperatura real debido a que el termopar perturbaba la medición por lo que la medición de temperatura se estableció como la temperatura del agua del baño térmico.



**Figura 4.13:** Conductividad térmica de diluciones glicérica con agua, los datos con línea discontinua se calcularon con la ecuación de Filippov mientras que los datos de línea continua corresponde a datos reportados por Segur & Oberstar (1951).

## 4.5. Propuesta de Modificación del Modelo de Nian-Sheng

La conductividad térmica de las diluciones se ve afectada por el contenido de agua, por ello, se realizó una modificación a la ecuación 2.15 de Cheng (2008). Teniendo en consideración el agua que funcionaba como baño térmico y que cada dilución tiene un cambio de temperatura diferente para cada proporción en peso desde 50 % hasta 90 %, se realizó una estimación de la temperatura real para cada dilución.

Para cada prueba se registró la temperatura de la dilución en la superficie de la aguja del adaptador UL. Esta temperatura registrada se etiquetó como  $T_{gw}$ , mientras que la temperatura que se registró, en el agua que funcionaba como baño térmico, durante la prueba de viscosidad fue etiquetada como  $T_{reg}$ .

Así que se calculó la diferencia entre  $T_{reg}$  y  $T_{gw}$  para obtener lo que se llamó temperatura modificada con la etiqueta  $T_{mod}$ .

$$T_{mod} = T_{reg} - T_{gw} \quad (4.7)$$

Obteniendo la temperatura modificada se calculó el promedio para cada temperatura. <sup>7</sup>.

$$\bar{T}_{mod} = \frac{1}{N} \sum T_i \quad (4.8)$$

El promedio  $\bar{T}_{mod}$  se utilizó como dato de entrada para la ecuación 2.15 de su respectiva dilución para obtener la viscosidad con respecto a su temperatura real.

$$\mu = \mu_w^\alpha \mu_g^{1-\alpha}$$

$$\alpha = 1 - C_m + \frac{abC_m(1 - C_m)}{aC_m + b(1 - C_m)}$$

Utilizando los coeficientes que ahora dependen del promedio de la temperatura modificada

$$a = 0.705 - 0.0017\bar{T}_{mod} \quad (4.9)$$

$$b = (4.9 + 0.036\bar{T}_{mod})a^{2.5} \quad (4.10)$$

---

<sup>7</sup>Cada temperatura pertenece al intervalo entre 20 °C hasta 60 °C, y contenía aproximadamente 200 datos.

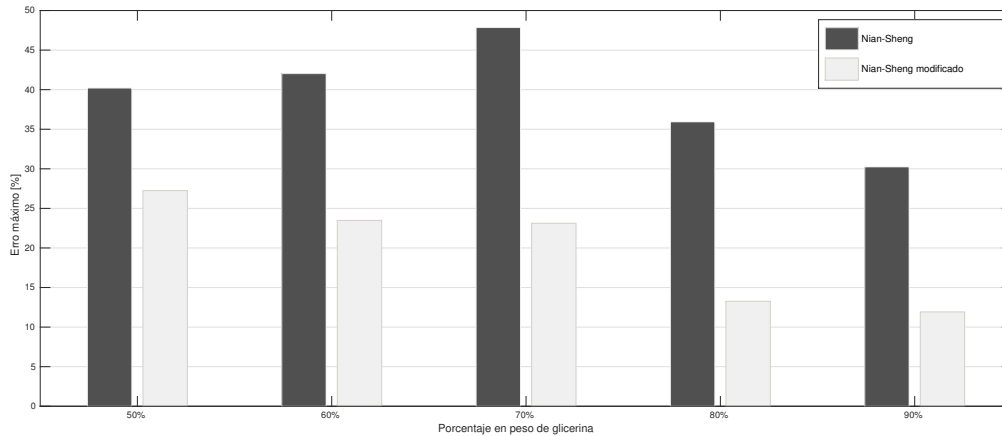
Además, el cálculo de las viscosidades de la glicerina y del agua también se modifican, teniendo ahora dependencia a el promedio de la temperatura modificada.

$$\mu_w = 1.790 \exp \left( \frac{(-1230 - \bar{T}_{mod}) \bar{T}_{mod}}{36100 + 360 \bar{T}_{mod}} \right) \quad (4.11)$$

$$\mu_g = 12100 \exp \left( \frac{(-1233 + \bar{T}_{mod}) \bar{T}_{mod}}{9900 + 70 \bar{T}_{mod}} \right) \quad (4.12)$$

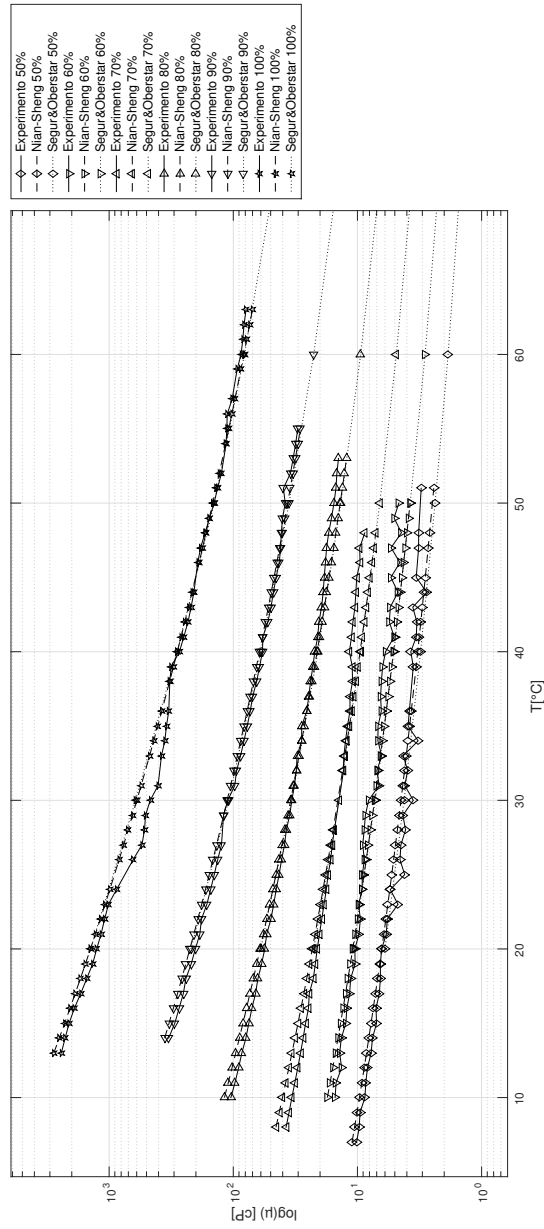
El porcentaje máximo de error de la viscosidad disminuyó considerablemente comparado con el porcentaje máximo de error de la viscosidad sin esta modificación Fig.4.14.

La viscosidad calculada con la temperatura modificada fue comparada con los datos experimentales, así como con los datos de reportados por Segur & Oberstar (1951). Los datos experimentales y los datos calculados con la ecuación 2.15 de Cheng (2008) fueron modificados únicamente con respecto a su temperatura; el valor de la viscosidad (medida experimentalmente) no fue modificada de ningún modo.



**Figura 4.14:** Comparación de porcentaje de error experimental con datos calculados con la ecuación de Nian-Sheng con modificación de temperatura.

En la Fig.4.15 se observa que los datos coinciden con los datos de referencia. Además, las viscosidades calculadas concuerdan en todas las diluciones. El intervalo de temperatura cambió con respecto al intervalo mostrado en la Fig.4.6 debido a la modificación de temperatura. El intervalo real de temperatura en este trabajo de las diluciones desde 50 % hasta 90 % de porcentaje en peso de glicerina fue aproximadamente desde 10 °C hasta 55 °C, mientras que el intervalo de temperatura que contiene 100 % glicerina se mantuvo al evitar las pérdidas del baño térmico.



**Figura 4.15:** Comparación de resultados experimentales con datos calculados con la ecuación de Cheng (2008) y con datos de Segur & Oberstar (1951) con modificación de temperatura.

# Capítulo 5

## CONCLUSIONES

### 5.1. Resumen

En este trabajo se realizó la medición de viscosidad dinámica para diluciones de glicerina con agua desde 50 % hasta 100 % fracción de peso, con un aumento de 10 % entre cada dilución, dentro de un intervalo de temperatura de 20 °C hasta 60 °C obteniendo así una base de datos para comparar con referencias citadas y realizar la discusión de sus variaciones. La variación principal en los datos fue causada por la limitación del registro de temperatura en la camisa del adaptador UL del viscosímetro Brookfield, se logró realizar el ajuste gracias que en cada registro experimental registré la temperatura de la dilución y calculaba la diferencia con la temperatura del agua que funcionaba como baño térmico, calculando el promedio de cada diferencia de temperaturas para cada dilución en cada temperatura (desde 20 °C hasta 60 °C). El procedimiento y la metodología aplicada para realizar los experimentos han sido los principales factores por los que las mediciones fueron afectadas, en particular el tipo de calentamiento para las mezclas debido a el ajuste del equipo disponible. Este tipo de observaciones son los que pueden ayudar al laboratorista cuando realiza un análisis de sus datos, pues se debe tomar en cuenta el entorno donde se realiza cualquier tipo de proceso.

## 5.2. Contribuciones

La utilidad de la glicerina en la industria mejora de manera significativa el estudio de fenómenos en campo, este fluido es uno de los más requeridos, no sólo en la industria petrolera, sino, en muchas más así como la industria alimenticia, farmacéutica, etc.

En este trabajo se logró:

- La propuesta, desarrollo y comprobación de una metodología para la medición y análisis de datos en diluciones de glicerina con agua.
- Se realizó una guía experimental destacando las consideraciones que implica el uso de éste fluido.
- Propuesta del modelo matemático de la viscosidad dependiente de la temperatura, se hace una mejora considerando los efectos de la conductividad térmica para la mezcla.

Además se advierte que el uso de la glicerina, por su propiedad hidroscópica, debe conservarse en recipientes cerrados y mantenerse en un ambiente seco para obtener resultados favorables. Además, para obtener la dilución correcta la prueba se debe realizar en fracciones de peso para facilitar y asegurar que las diluciones correspondan de manera más precisa a los porcentajes objetivo.

## 5.3. Recomendaciones y trabajo futuro

Para la medición futura de diferentes diluciones que puedan ser probadas en el laboratorio de flujo multifásico del Instituto de Ingeniería, se debe considerar el efecto de las condiciones de la instalación, como ya se mencionó ese fue uno de los principales factores que afectaban los datos experimentales de la viscosidad. Además el Instituto de Ingeniería podría obtener algún accesorio de baño térmico Brookfield como TC-150 o TC-250. Con el propósito de controlar la temperatura de las diluciones o cualquier fluido que se requiera en los futuros trabajos.

# Bibliografía

- Barnes, H., Hutton, J. & Walters, K. (1989), *An Introduction to Rheology*, Elsevier Science & Technology.
- Bird, R., Stewart, W. & Lightfoot, E. (2004), *Fenômenos de transporte*.
- BRO (n.d.a), *BROOKFIELD DV2T Viscometer Operating Instructions*.  
**URL:** <http://www.brookfieldengineering.com>
- BRO (n.d.b), *Enhanced UL Adapter Assembly Operating Instruction*.  
**URL:** <http://www.brookfieldengineering.com>
- Castellan, G. & Basín, M. (n.d.), *Fisicoquímica*, Addison-Wesley Iberoamericana.
- Cheng, N.-S. (2008), ‘Formula for the viscosity of a glycerol-water mixture’, *Ind. Eng. Chem. Res.* **47**, 3285.
- Chenlo, F., Moreira, R., Pereira, G. & Bello, B. (2004), ‘Kinematic viscosity and water activity of aqueous solutions of glycerol and sodium chloride’, *Eur. Food Res. Technol.* **219**, 403.
- de la Cruz, J. L. M., Alvarez-Badillo, S., Ramírez-Jaramillo, E., Aquino-Olivos, M. A. & Orea, P. (2013), ‘Measurements and correlation of mexican heavy dead crude oil viscosities’, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **110**, 184 – 192.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092041051300243X>
- Hein, F. J. (2017), ‘Geology of bitumen and heavy oil: An overview’, *Journal of Petroleum Science and Engineering* **154**, 551–563.
- Incropera, F. & DeWitt, D. (1999), *Fundamentos de transferencia de calor*, Pearson Educación.

Kline, S. J. (1953), 'Describing uncertainty in single sample experiments', *Mech. Engineering* **75**, 3–8.

**URL:** <https://ci.nii.ac.jp/naid/10007206317/en/>

Mota, C. J., Pinto, B. P. & de Lima, A. L. (2017), *Glycerol A Versatile Renewable Feedstock for the Chemical Industry*, Springer.

Mott, R. & Brito, J. (2006), *Mecánica de fluidos*, Pearson Educación.

Pemex, E. y. P. . (2017), 'Evaluación de las reservas de hidrocarburos 1 de enero de 2017'.

**URL:** [www.pemex.com](http://www.pemex.com)

Poling, B. E., Prausnitz, J. M. & O'Connell, J. P. (2001), *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill.

Ramírez-Navas, J. (2006), *Introducción a la Reología de los alimentos*.

Segur, J. B. & Oberstar, H. E. (1951), 'Viscosity of glycerol and its aqueous solutions', *Ind. Eng. Chem.* **43**, 2117.

Shankar, P. N. & Kumar, M. (1994), 'Experimental determination of the kinematic viscosity of glycerol-water mixtures', *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **444**, 573.

Supply, M. M. L. (n.d.), 'Thermo scientific supenuova+ ceramic digital'.

**URL:** <https://www.mcqueenlabs.com/stir/supenuova-s88857190.phpresources>

Trejo González, J. A., Longinotti, M. P. & Corti, H. R. (2011), 'The viscosity of glycerol-water mixtures including the supercooled region', *Journal of Chemical & Engineering Data* **56**(4), 1397–1406.



# Apéndice A

## ESTUDIO ÓPTICO DEL IINGEN

En esta sección se muestra el trabajo de los ingenieros Gerardo Juárez y Alan Olvera. Realizaron el estudio óptico de difusión en mezcla bifásica glicerina-glicerina diluida en agua en el IINGEN con el objetivo de desarrollar una carta y modelos matemáticos para predecir los grados de difusión de la mezcla a través del tiempo, en distintas condiciones. Además éste estudio se utilizó para determinar la viabilidad de la glicerina como fluido de experimentación en el laboratorio de flujo multifásico.

# Estudio óptico de difusión en mezcla bifásica glicerina-glicerina diluida en agua

ING. GERARDO JUÁREZ CHÁVEZ, ING. ALAN JOSUE OLVERA MATA

## Objetivo

- Desarrollar una carta y modelos matemáticos para predecir los grados de difusión de la mezcla, a través del tiempo, en distintas condiciones.
- Determinar la viabilidad de la glicerina como fluido de experimentación en el laboratorio de flujo multifásico.

## Metodología

El estudio consistió en documentar con fotografías el avance de la interfase ( $\delta$ ) entre las dos fases de una mezcla glicerina-glicerina diluida en agua, para distintas concentraciones de agua en la fase diluida. La fase de glicerina diluida en agua era la fase superior, cuya superficie libre estaba a una altura por encima de la interfase ( $h$ ), mientras que la fase de glicerina pura era la inferior y ambas estaban contenidas en una probeta, de diámetro conocido ( $\varphi$ ), como se muestra en la figura 1. La fase pura ocupaba la misma cantidad de volumen que la fase diluida y el nivel original de la interfase ( $z_0$ ) correspondía al inicio de cada experimento. Se tomó una serie de fotografías del nuevo nivel de la interfase ( $z$ ), captándose una imagen cada cierto intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ). Finalmente, se le agregó colorante vegetal rojo a la fase diluida, para hacer más sencilla su visualización.

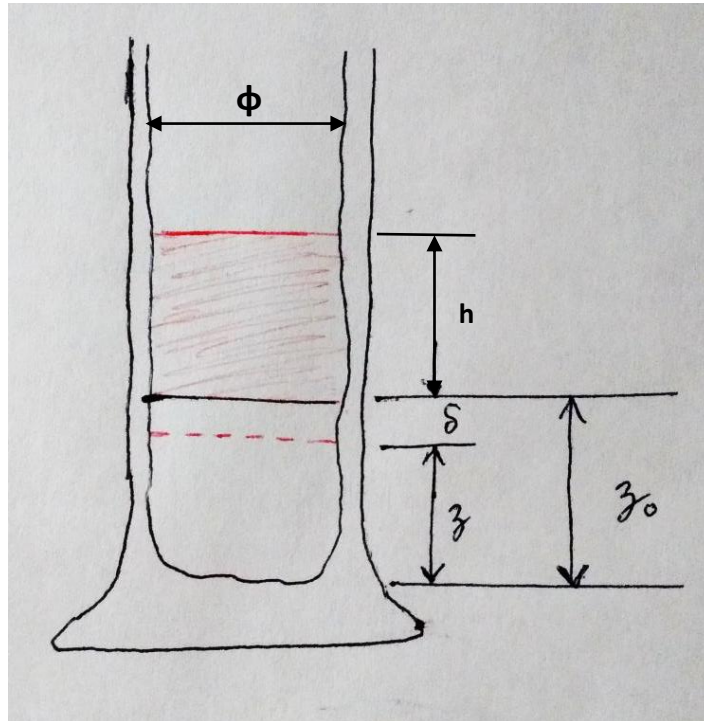


Figura 1. Esquema del experimento

Se plantearon tres casos de interés:

1. Difusión en condiciones estáticas
2. Difusión en condiciones dinámicas (suaves)
3. Difusión en condiciones dinámicas (bruscas)

En (1), simplemente se estudió el avance de la interfase sin perturbación alguna de la mezcla, esperándose que los tiempos de difusión fueran los más largos. En (2), se agitó la mezcla por intervalos, de manera que la interfase oscilara y sin invertir la probeta, esperándose que los tiempos de difusión fueran de longitud media. En (3), se agitó la mezcla por intervalos también, pero invirtiendo la probeta por completo en cada ciclo, por lo que los tiempos de difusión debían ser los más cortos. La agitación se llevó a cabo en un dispositivo electromecánico de construcción propia. Las concentraciones de la fase diluida variaron desde 0% glicerina hasta 90% glicerina, cambiando de 10% en 10%, y cada serie de fotografías se realizó 5 veces. La tabla 1 resume algunos de los parámetros más importantes para cada uno de los casos.

Tabla 1. Parámetros de los experimentos

	Estático	Dinámico (suave)	Dinámico (brusco)
<b>t</b>	42 h	400 s	240 s
<b>Δt</b>	6 h	100 s	60 s

$\Phi$			
V <sub>fase</sub>	10 ml	30 ml	30 ml
Fotografías por experimento	8	5	5
Número de concentraciones	10	10	10
Fotografías por serie	80	50	50
Repeticiones	5	5	5
Total de fotografías	400	250	250

Se graficaron las magnitudes  $z$  y  $\delta$  contra tiempo, para distintas concentraciones, y contra concentración, para distintos tiempos. Para compensar variaciones en los niveles de las fases, debido a incertidumbre experimental, y los diámetros diferentes de las probetas, se definió el parámetro adimensional:

$$\delta^* = \frac{\delta}{h}$$

Este parámetro  $\delta^*$  se denominó como *desplazamiento adimensional de la interfase* y fue el que se utilizó para generar la carta de difusión. Se definió también el siguiente parámetro adimensional:

$$z^* = \frac{z}{z_0}$$

En este caso,  $z^*$  representa el *nivel adimensional de la interfase*, el cual solamente sirve útil para visualizar más fácilmente los resultados. Físicamente, sólo  $\delta^*$  debe tomarse como una representación objetiva del grado de difusión de la mezcla.

### Avances

Hasta el momento, se han realizado los siguientes avances:

- Se completaron los experimentos del caso estático.
- Se completaron los experimentos del caso dinámico (brusco).
- Se desarrolló un programa de computadora para identificar objetivamente, con base a cambios en el brillo de las fotografías en blanco y negro, el nivel de la interfase en el caso estático.
- Se construyó la carta de difusión de agua en glicerina considerando los casos que se completaron y utilizando los promedios de  $\delta^*$ , así como aproximaciones de las series de puntos con polinomios de grado 1 o 2.
- Se midió la viscosidad dinámica de la glicerina utilizada y de las diluciones con mayor concentración de glicerina, para verificar la confiabilidad de los resultados.

Los aspectos que todavía están por concluir son los siguientes:

- Completar los experimentos del caso dinámico (suave).
- Agregar a la carta de difusión los nuevos datos obtenidos.
- Medir la viscosidad dinámica de las diluciones con menor concentración de glicerina.
- Desarrollar un modelo matemático, adicional a los modelos de regresión de la carta, para predecir lo observado experimentalmente.

## Resultados

### 1. Caso estático

A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas para el caso estático (figuras 2 a 9) y una de las series de fotografías (figura 10) para el mismo. Únicamente se agregaron las gráficas de los promedios de los datos obtenidos, incluyendo los modelos estadísticos que corresponden a los parámetros adimensionales.

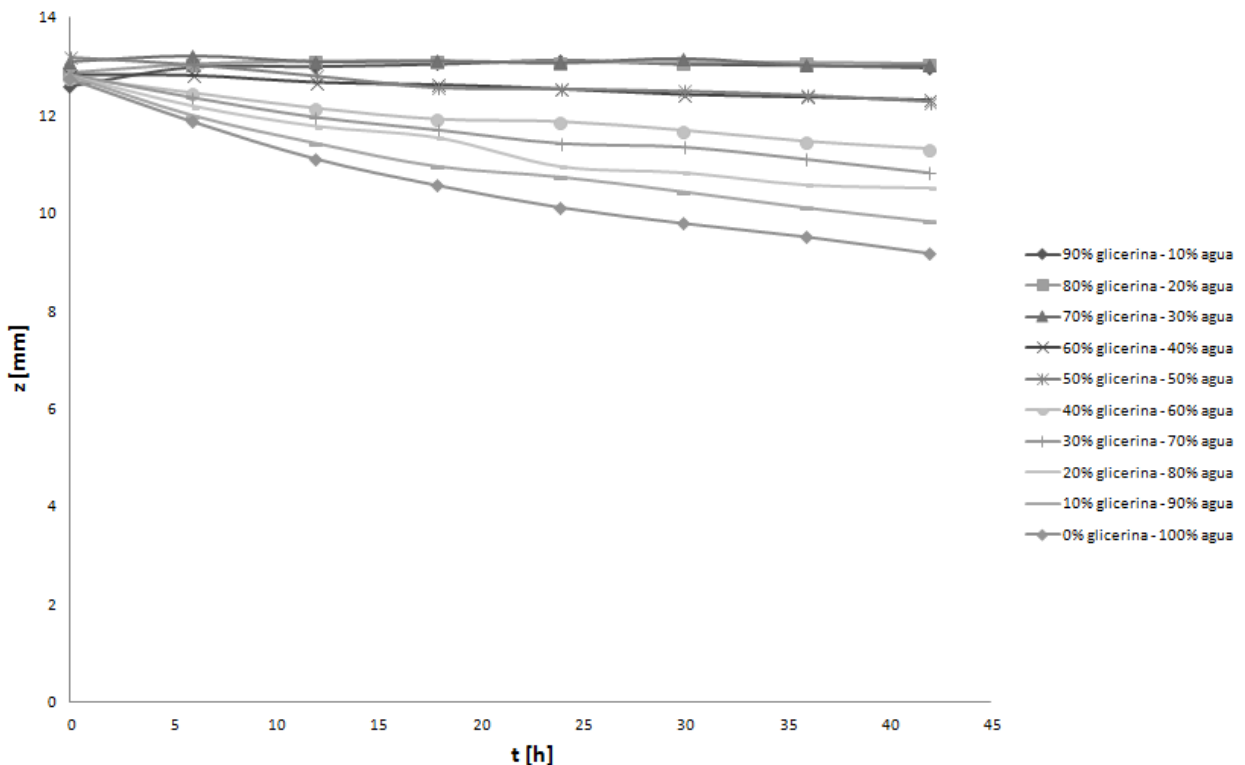


Figura 2. Nivel de la interfase contra tiempo, en condiciones estáticas, para distintas concentraciones

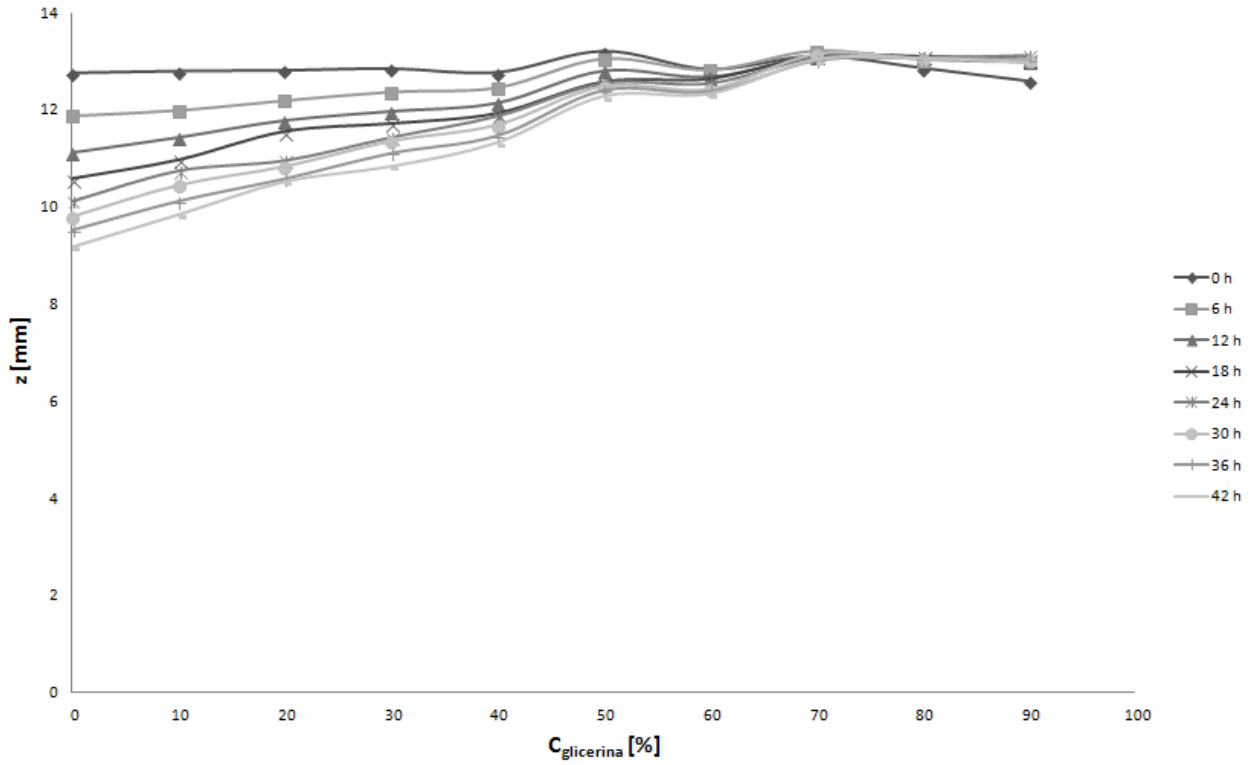


Figura 3. Nivel de la interfase contra concentración, en condiciones estáticas, para distintos tiempos

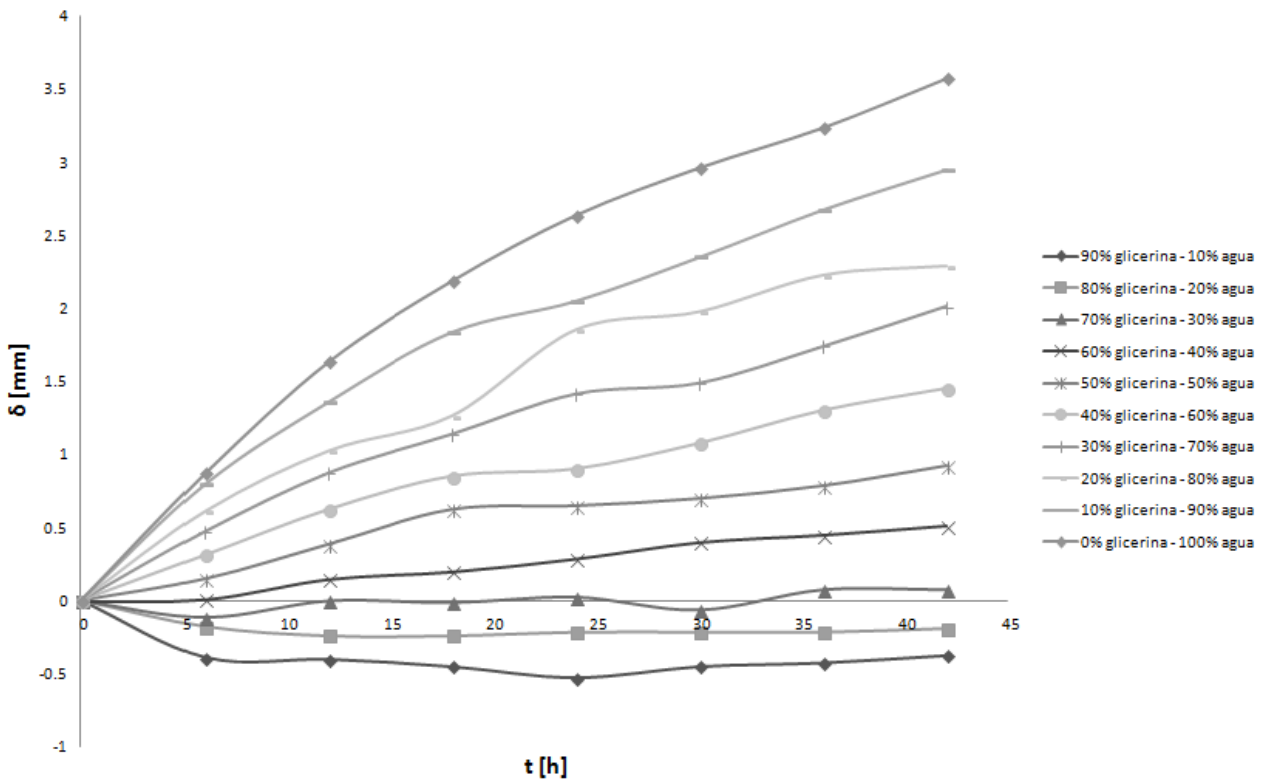


Figura 4. Desplazamiento de la interfase contra tiempo, en condiciones estáticas, para distintas concentraciones

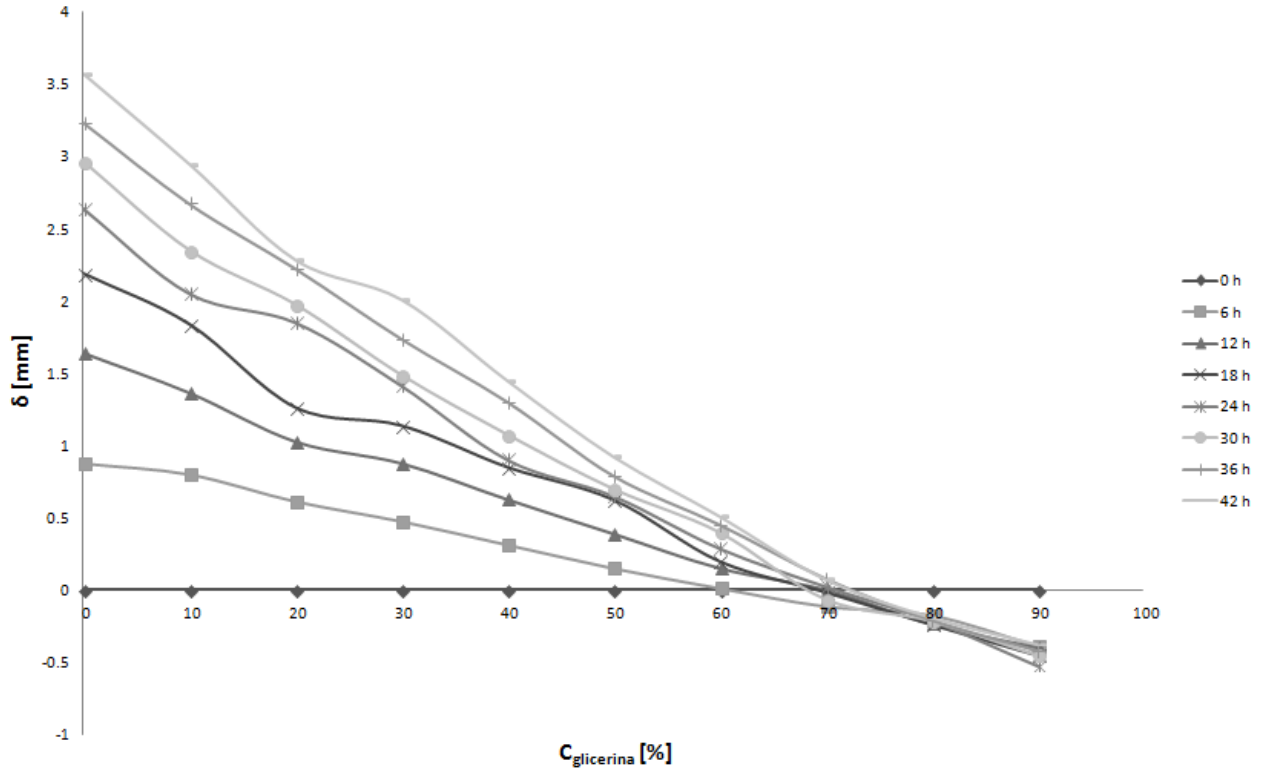


Figura 5. Desplazamiento de la interfase contra concentración, en condiciones estáticas, para distintos tiempos

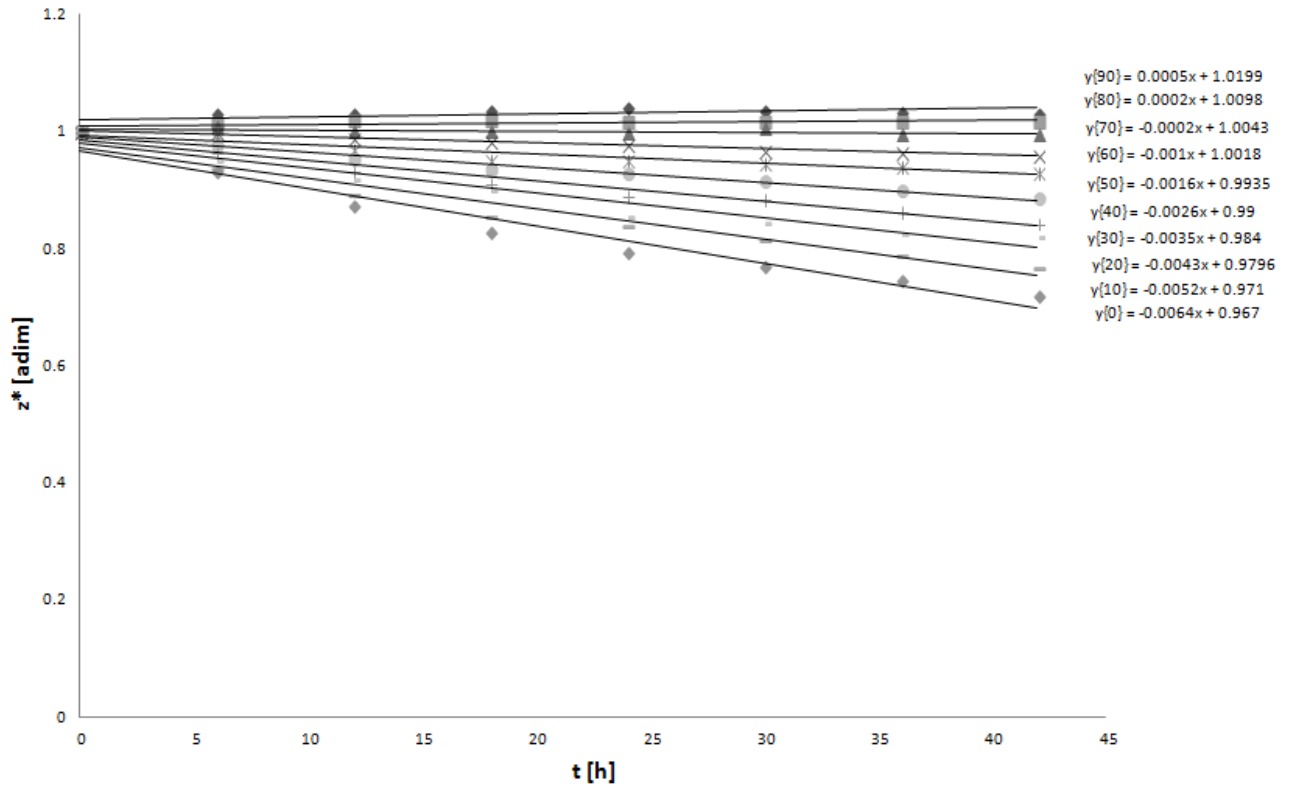


Figura 6. Nivel adimensional de la interfase contra tiempo, en condiciones estáticas, para distintas concentraciones

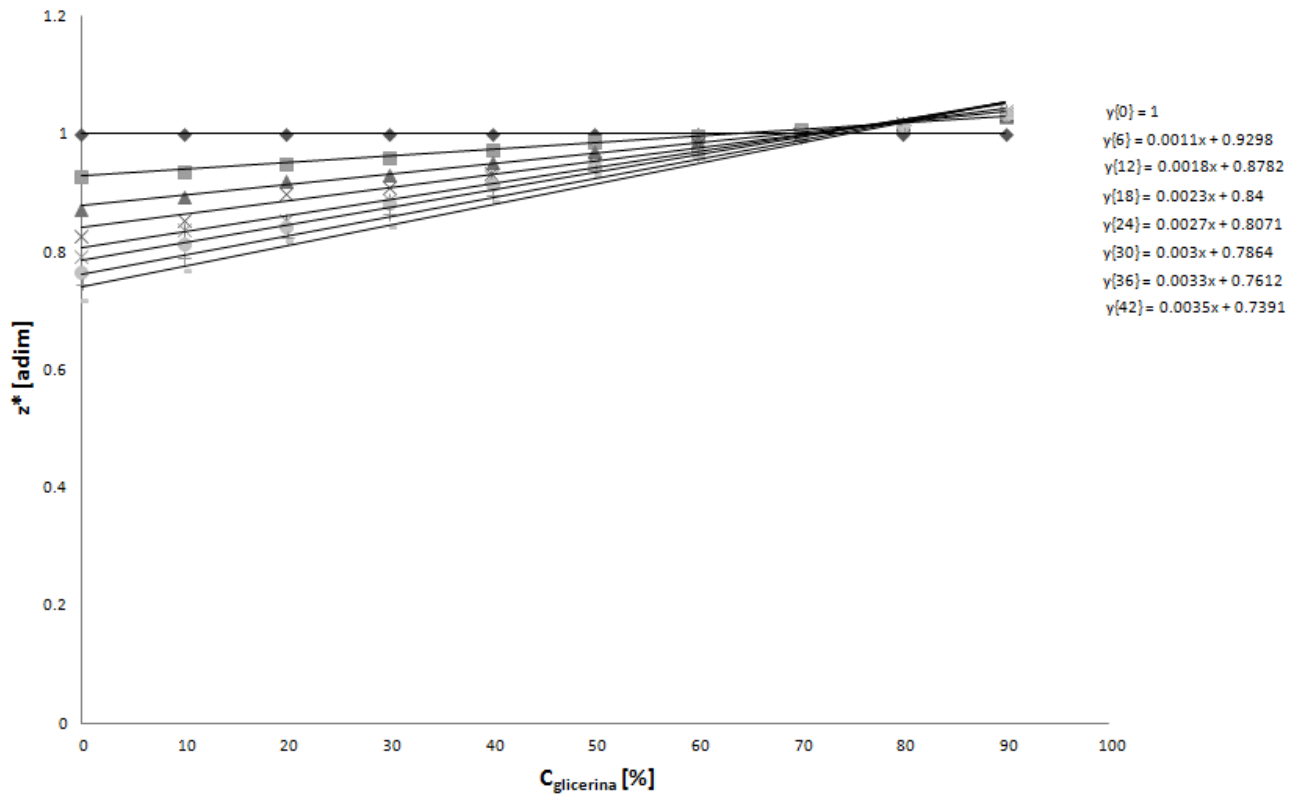


Figura 7. Nivel adimensional de la interfase contra concentración, en condiciones estáticas, para distintos tiempos

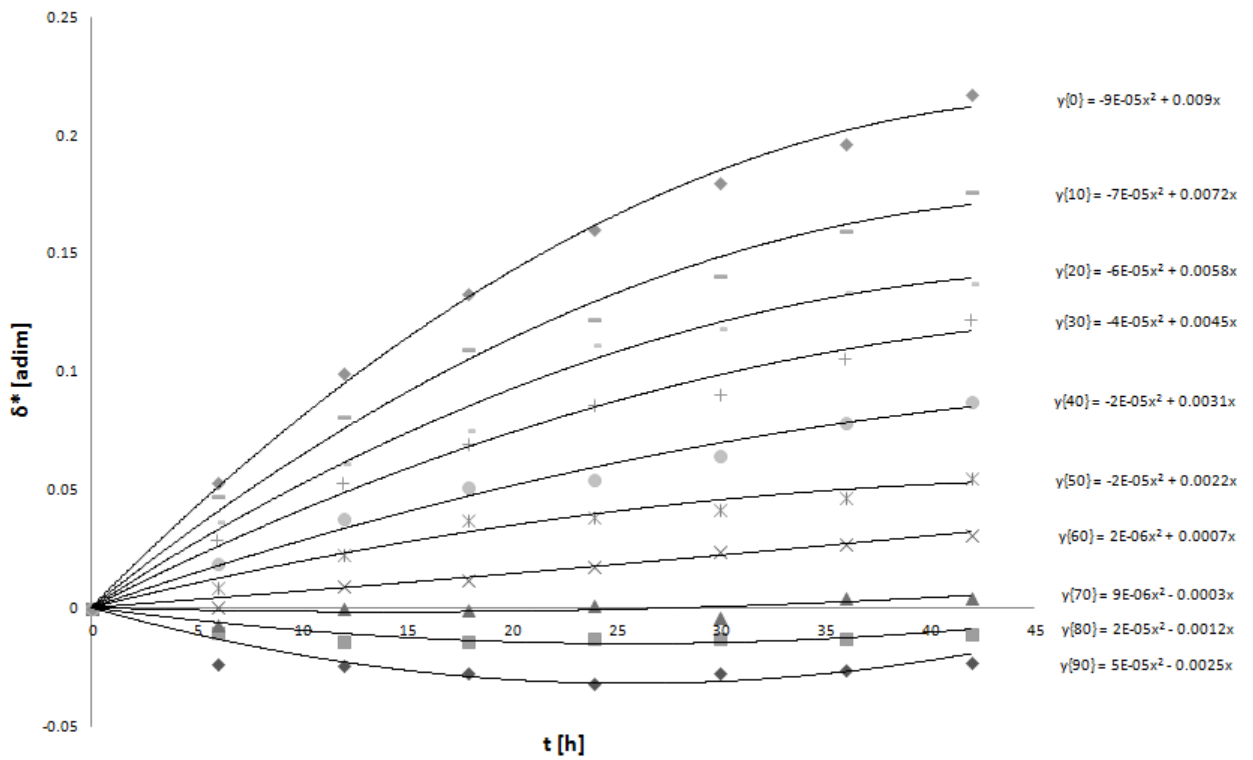


Figura 8. Desplazamiento adimensional de la interfase, contra tiempo, para distintas concentraciones



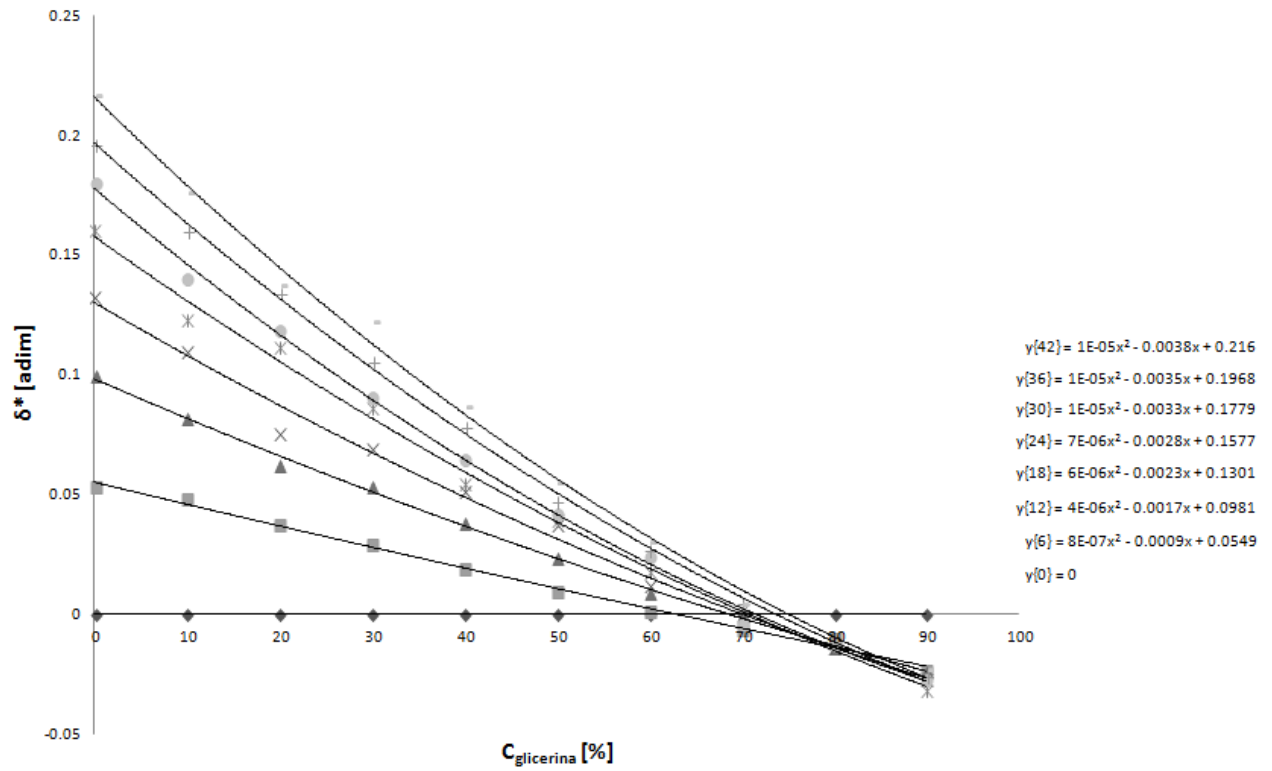
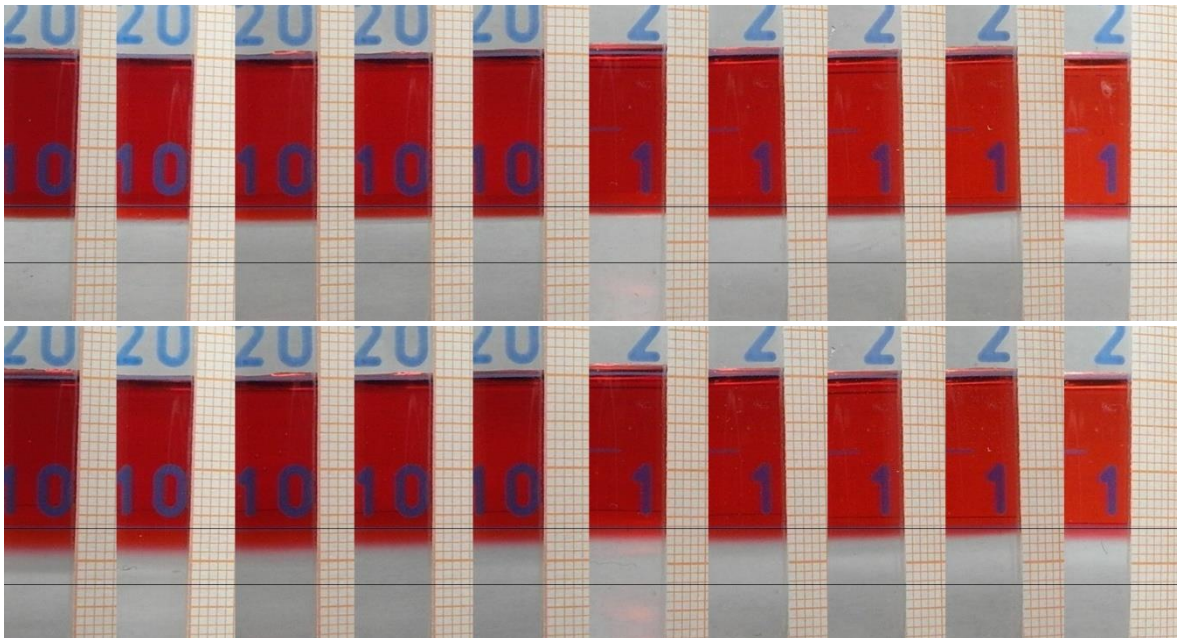
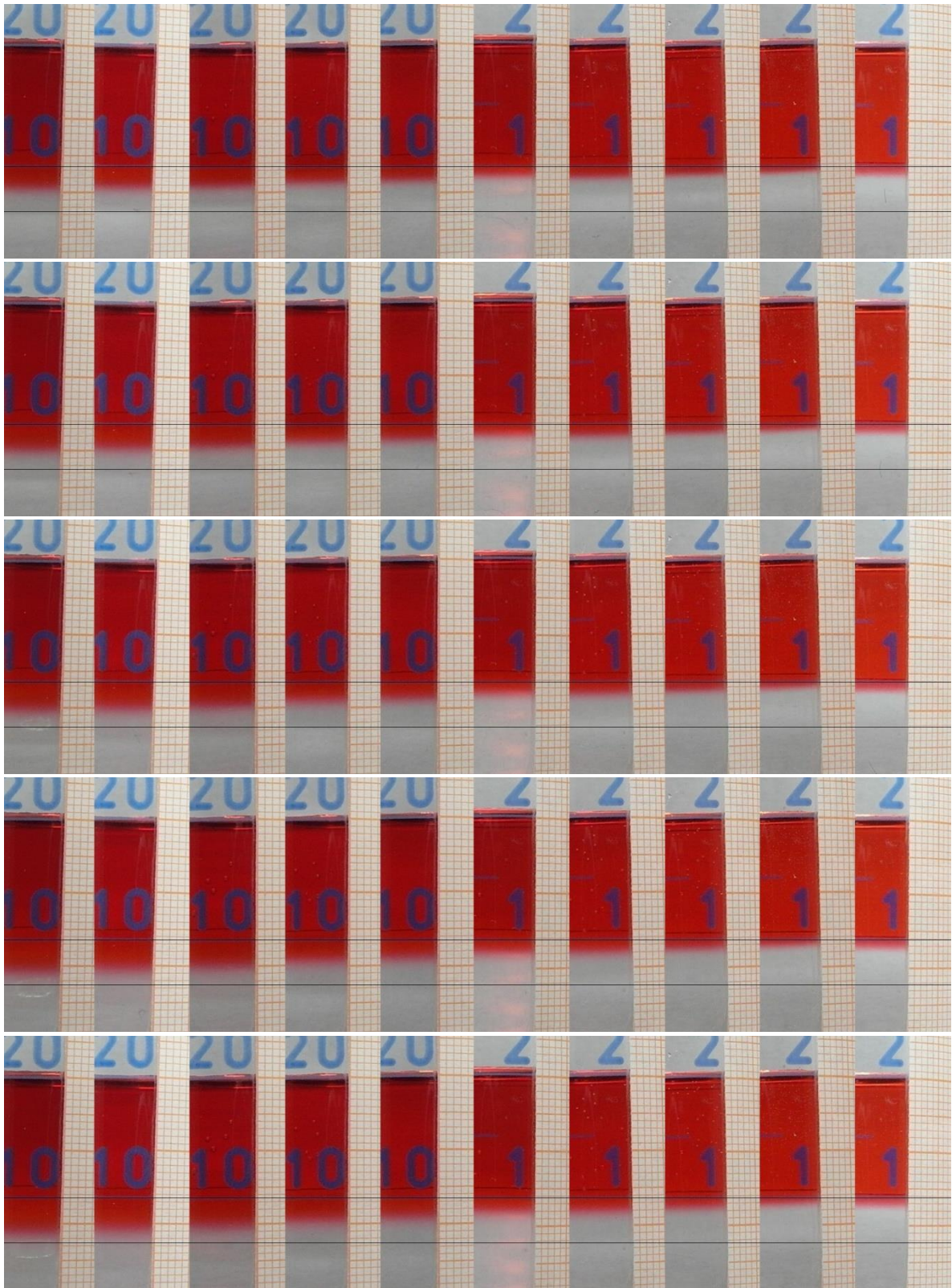


Figura 9. Desplazamiento adimensional de la interfase contra concentración, en condiciones estáticas, para distintos tiempos





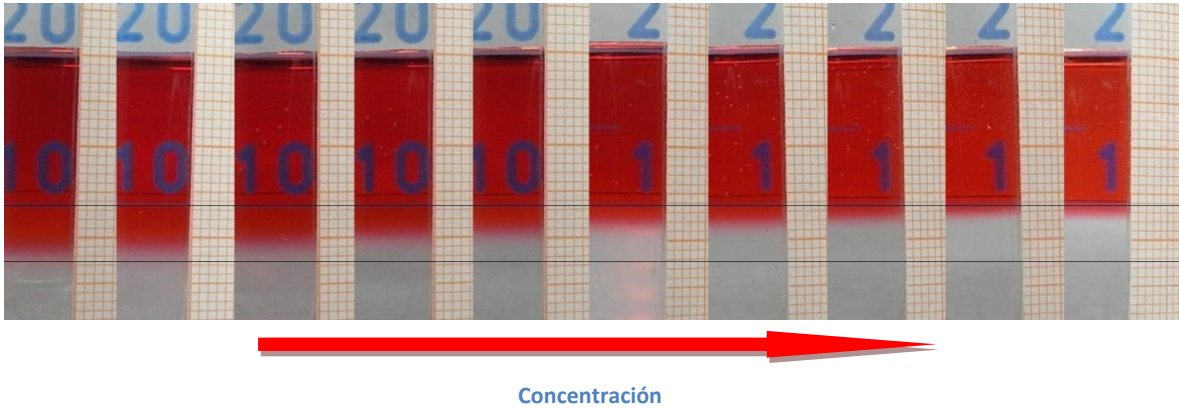


Figura 10. Serie (#1) de fotografías para el caso estático. La concentración cambia desde 0% hasta 90% de glicerina, de 10% en 10%, de izquierda a derecha; y el tiempo cambia de 0 h hasta 42 h, de 6 h en 6 h, de arriba hacia abajo

## 2. Caso dinámico

A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas para el caso estático (figuras 11 a 18) y una de las series de fotografías (figura 19) para el mismo. Únicamente se agregaron las gráficas de los promedios de los datos obtenidos, incluyendo los modelos estadísticos que corresponden a los parámetros adimensionales.



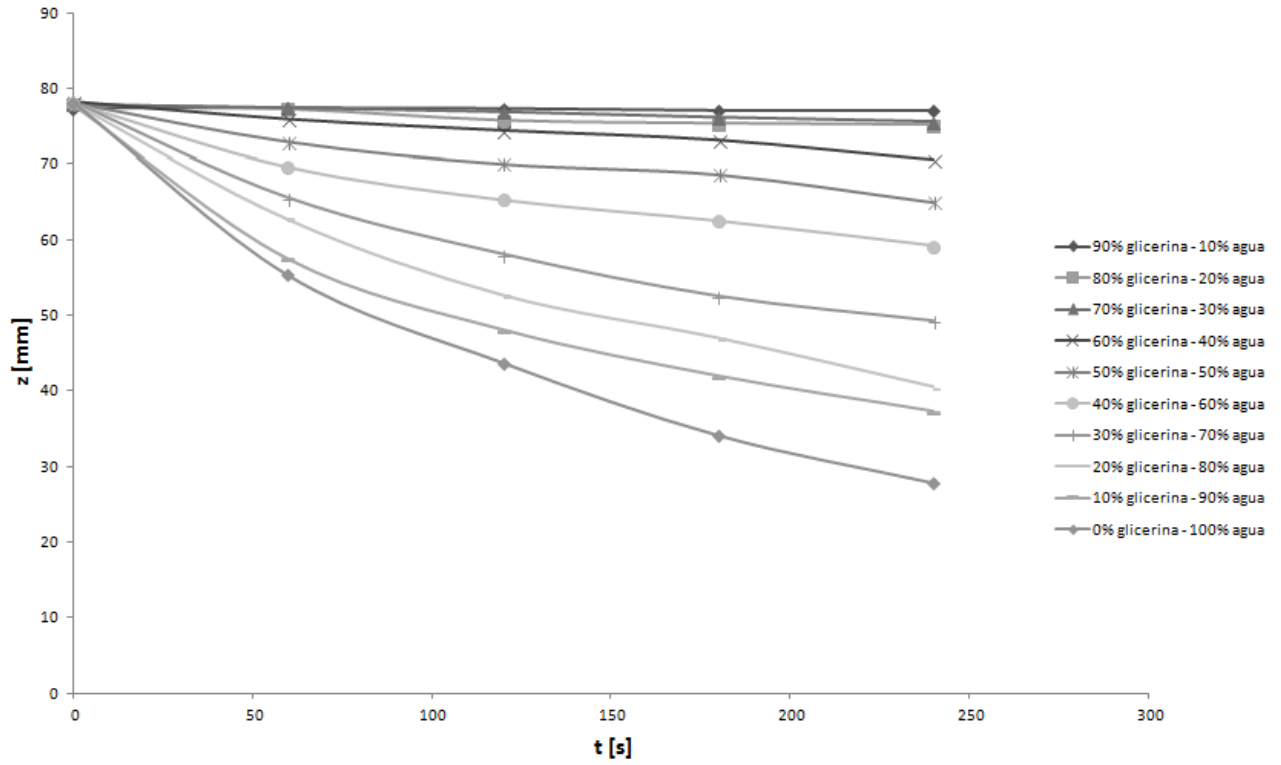


Figura 11. Nivel de la interfase contra tiempo, en condiciones dinámicas bruscas, para distintas concentraciones

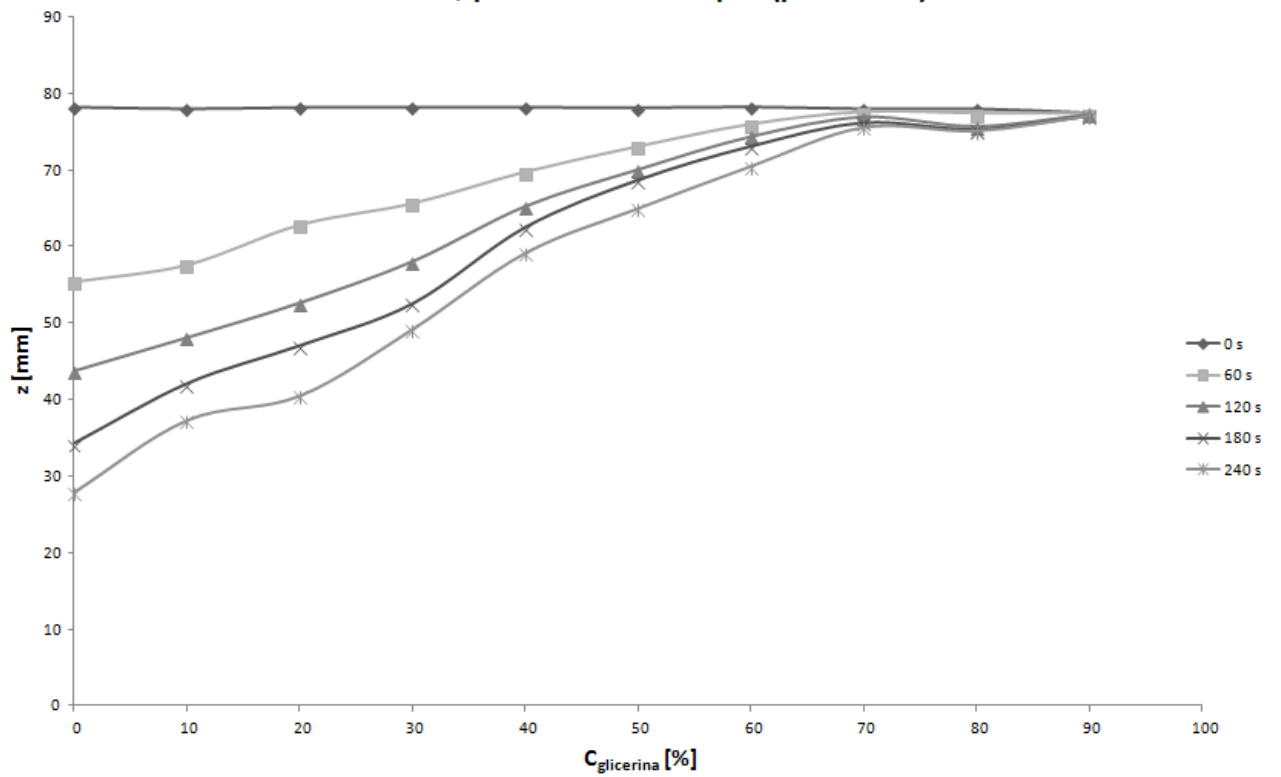


Figura 12. Nivel de la interfase contra concentración, en condiciones dinámicas bruscas, para distintos tiempos

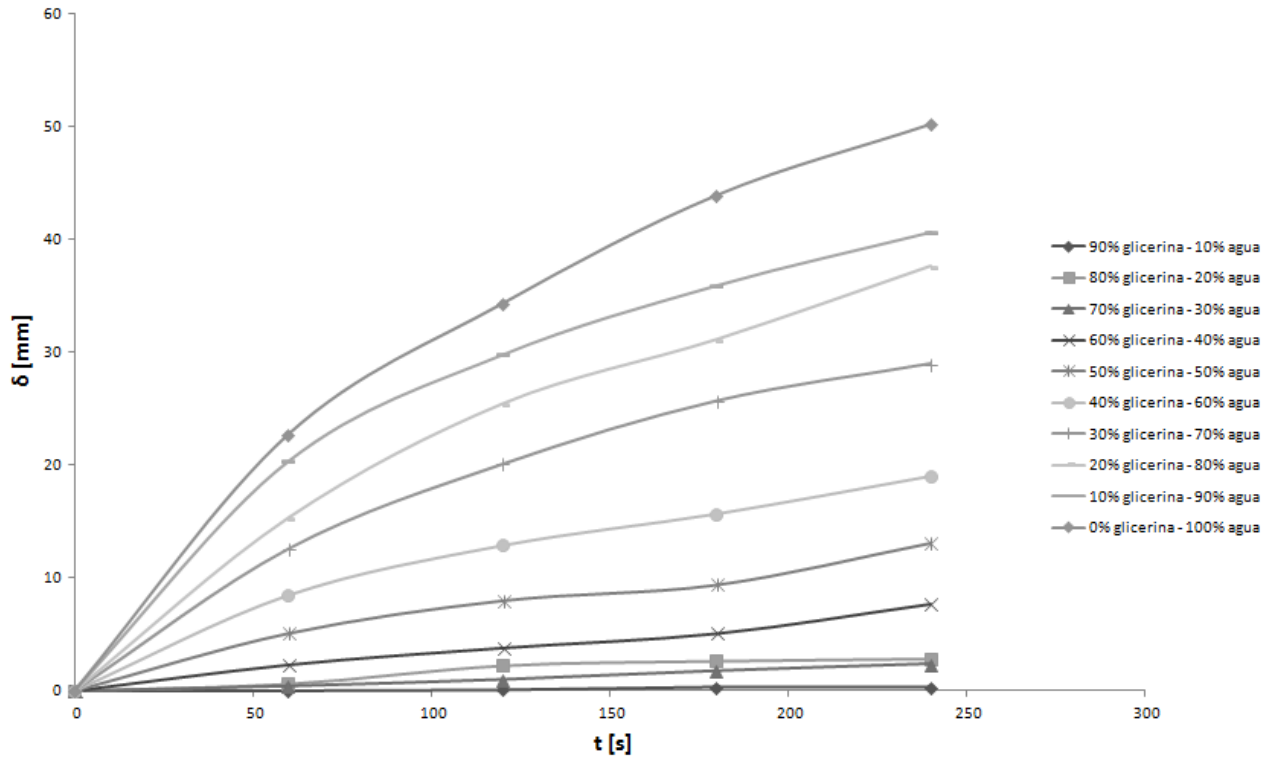


Figura 13. Desplazamiento de la interfase contra tiempo, en condiciones dinámicas bruscas, para distintas concentraciones

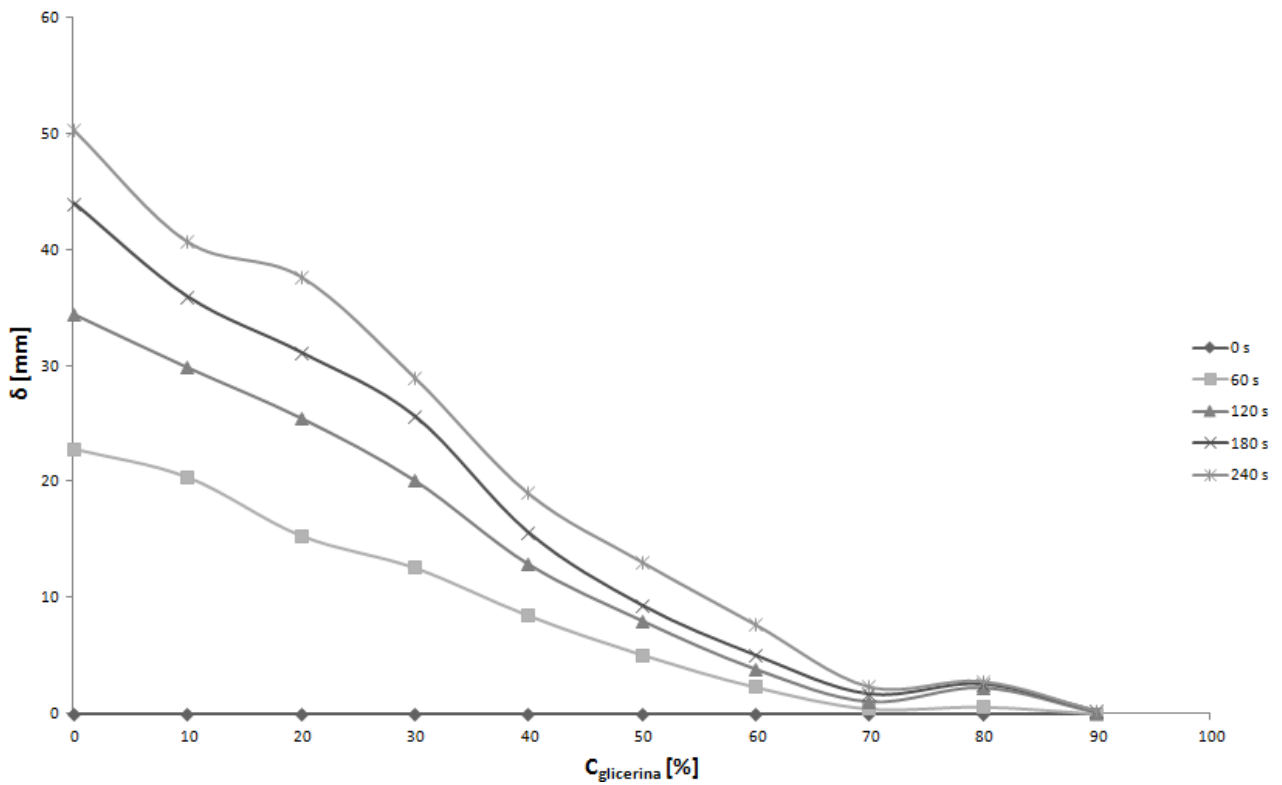


Figura 14. Desplazamiento de la interfase contra concentración, en condiciones dinámicas bruscas, para distintos tiempos

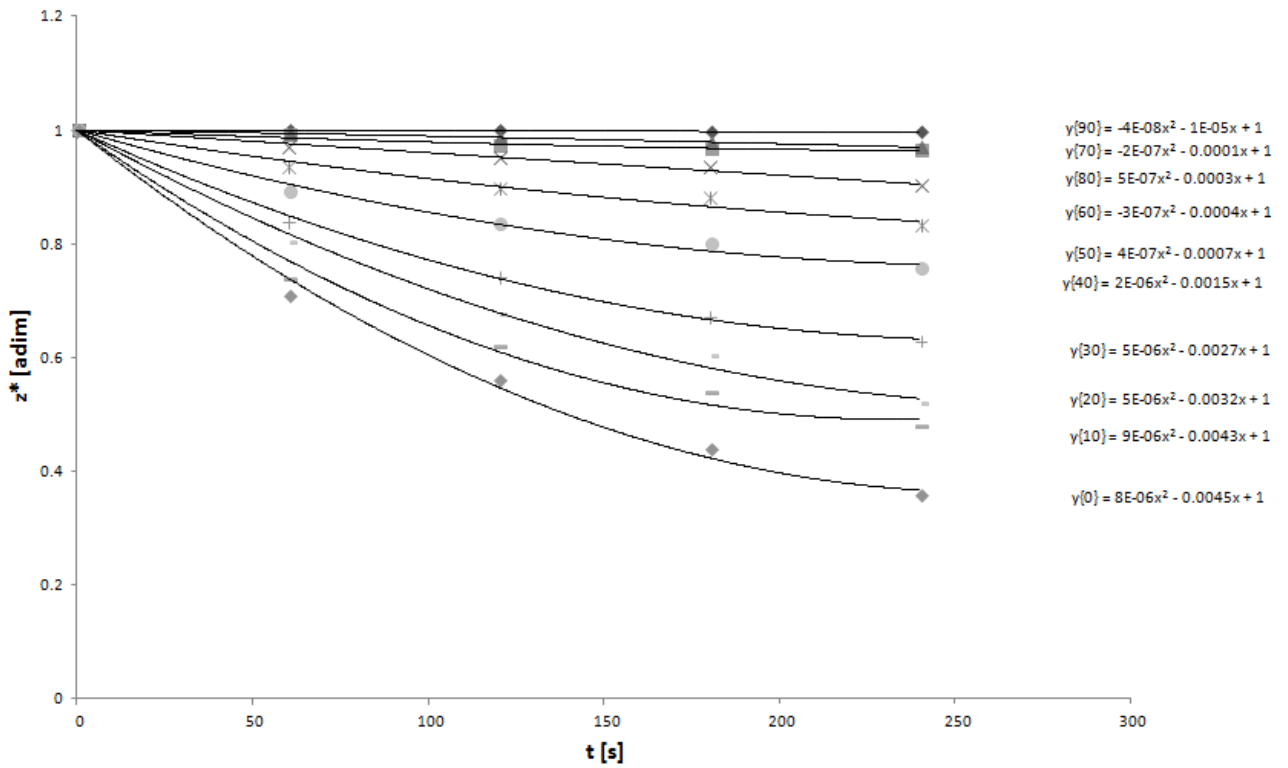


Figura 15. Nivel adimensional de la interfase contra tiempo, en condiciones dinámicas bruscas, para distintas concentraciones

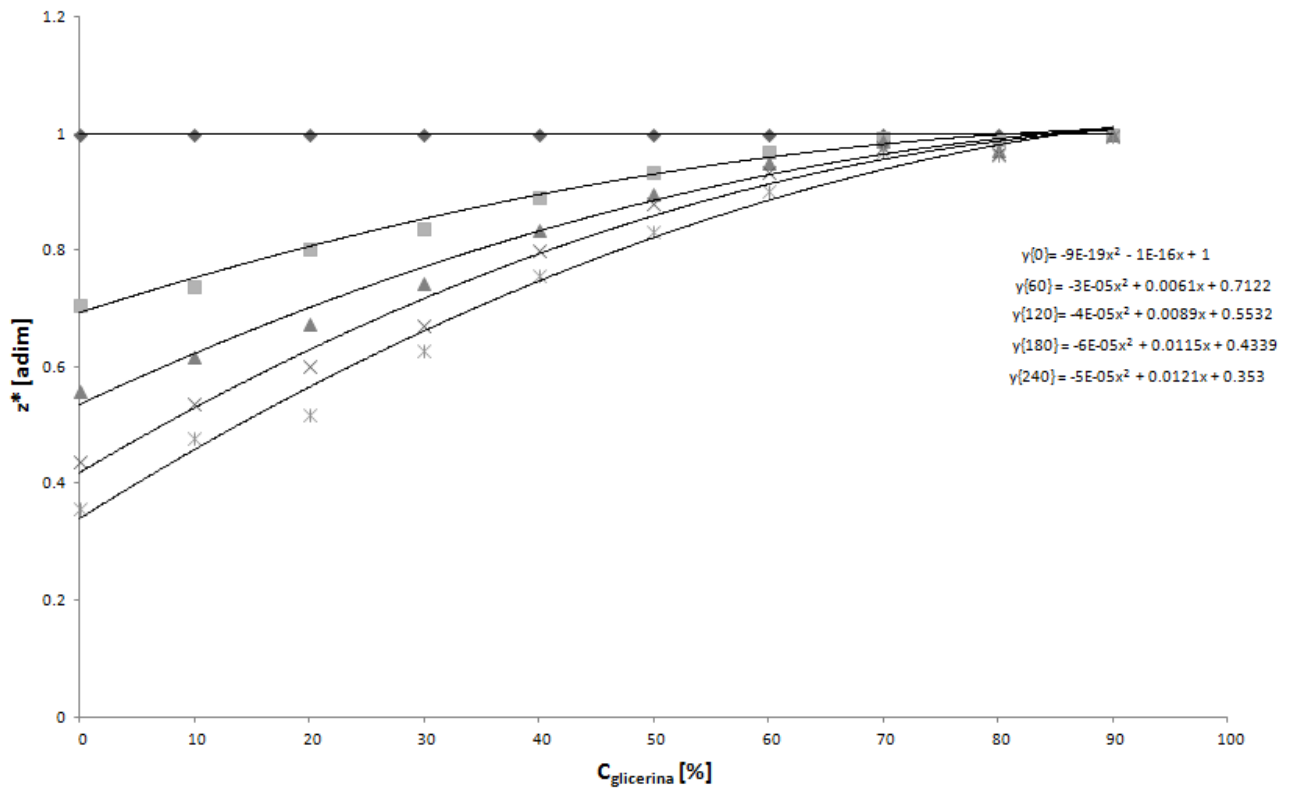


Figura 16. Nivel adimensional de la interfase contra concentración, en condiciones dinámicas bruscas, para distintos tiempos

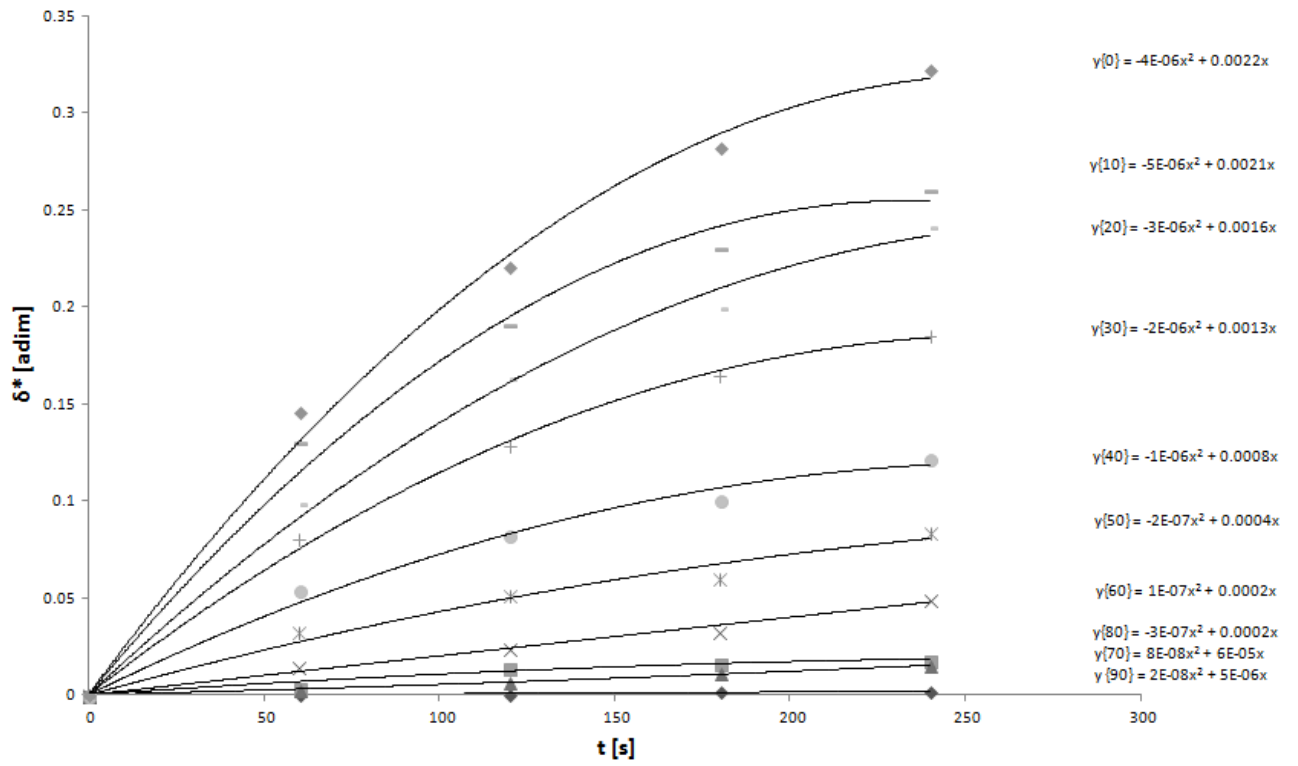


Figura 17. Desplazamiento adimensional de la interfase contra tiempo, en condiciones dinámicas bruscas, para distintas concentraciones

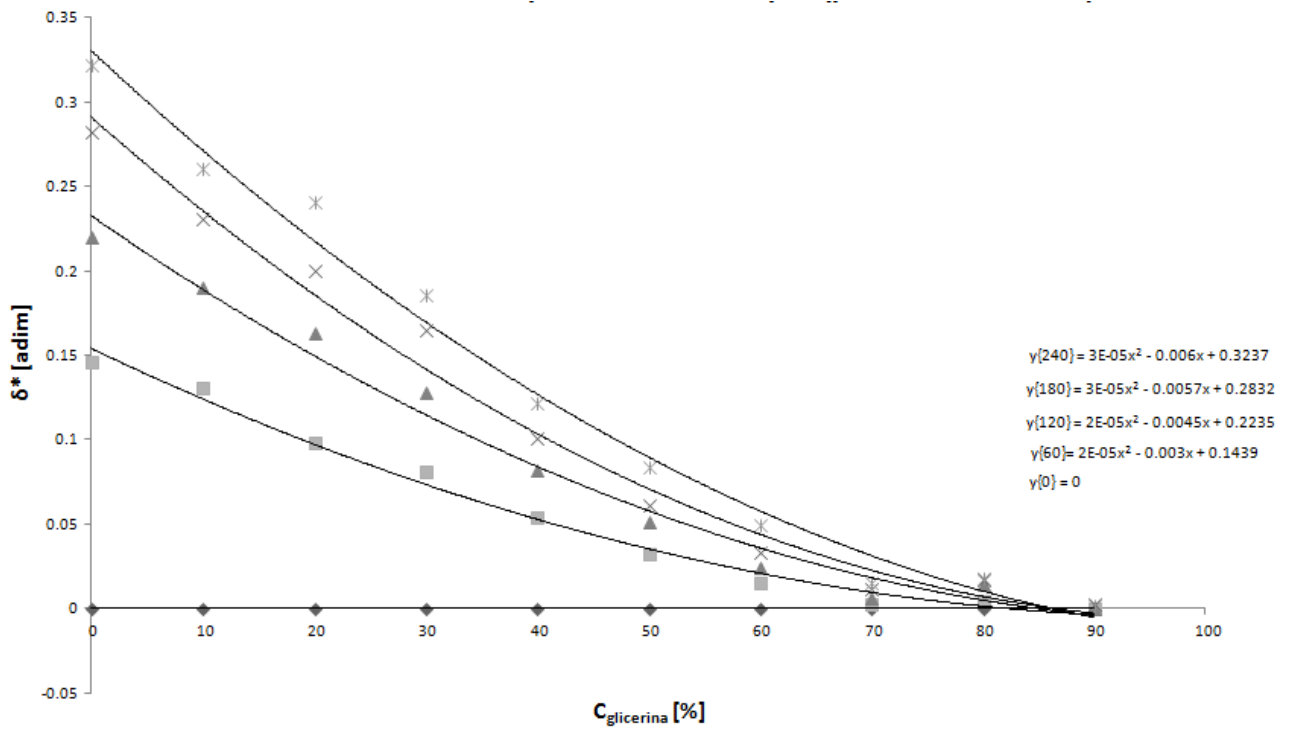
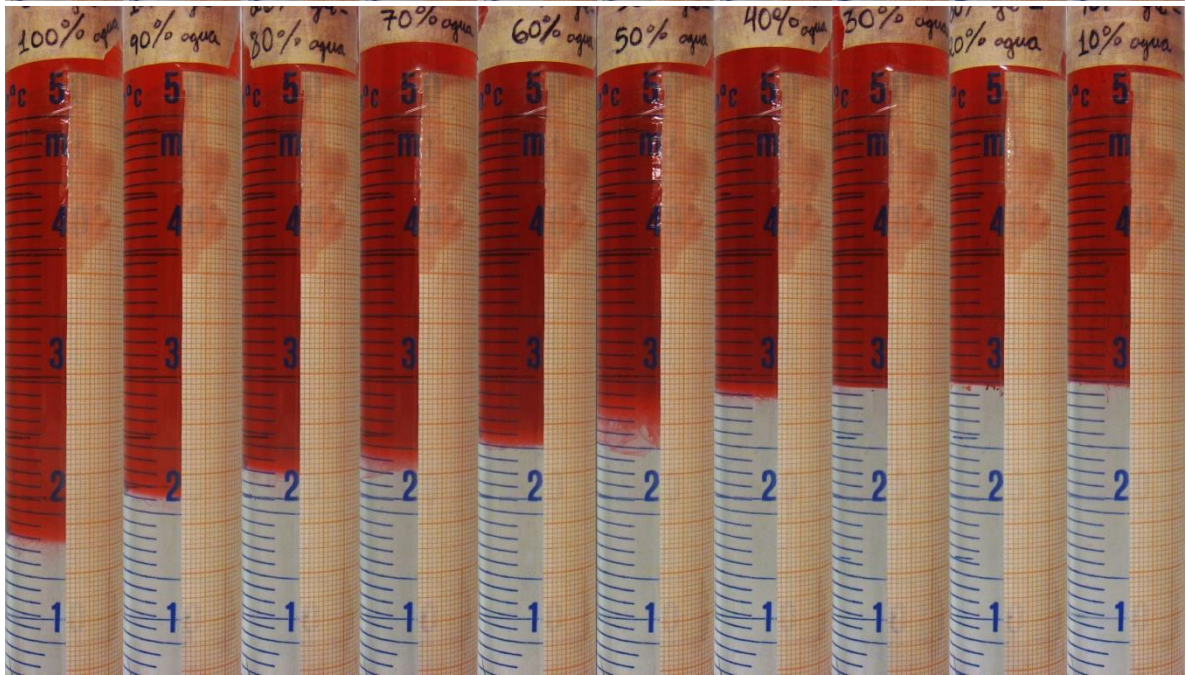
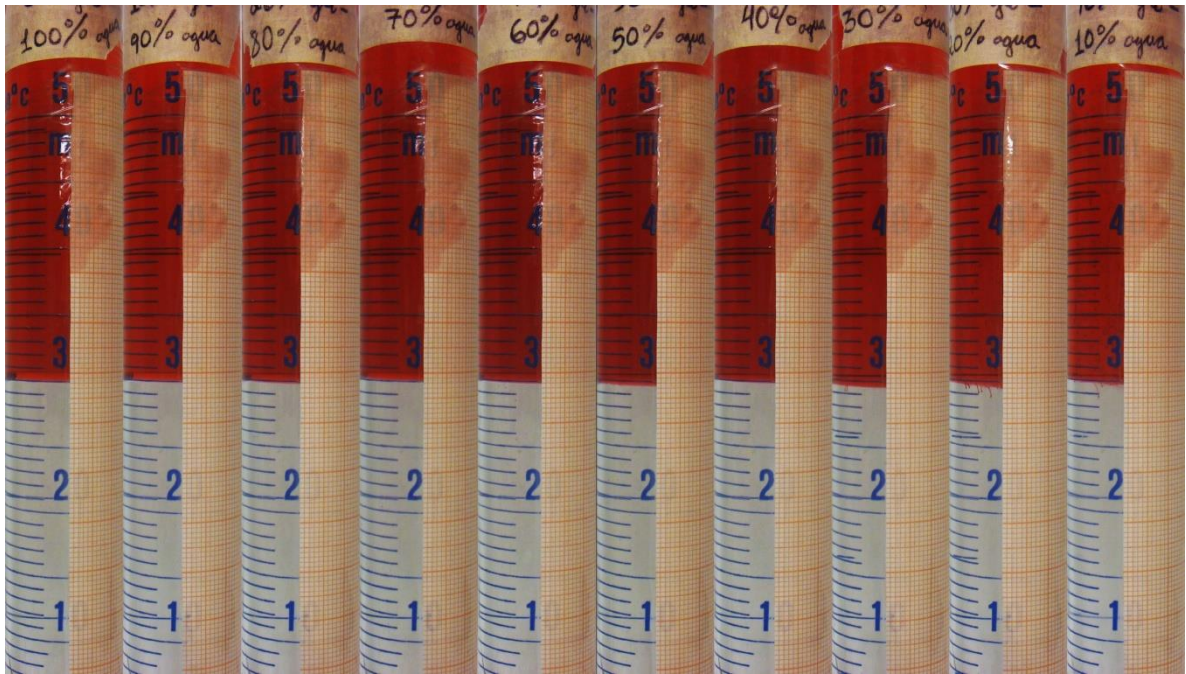
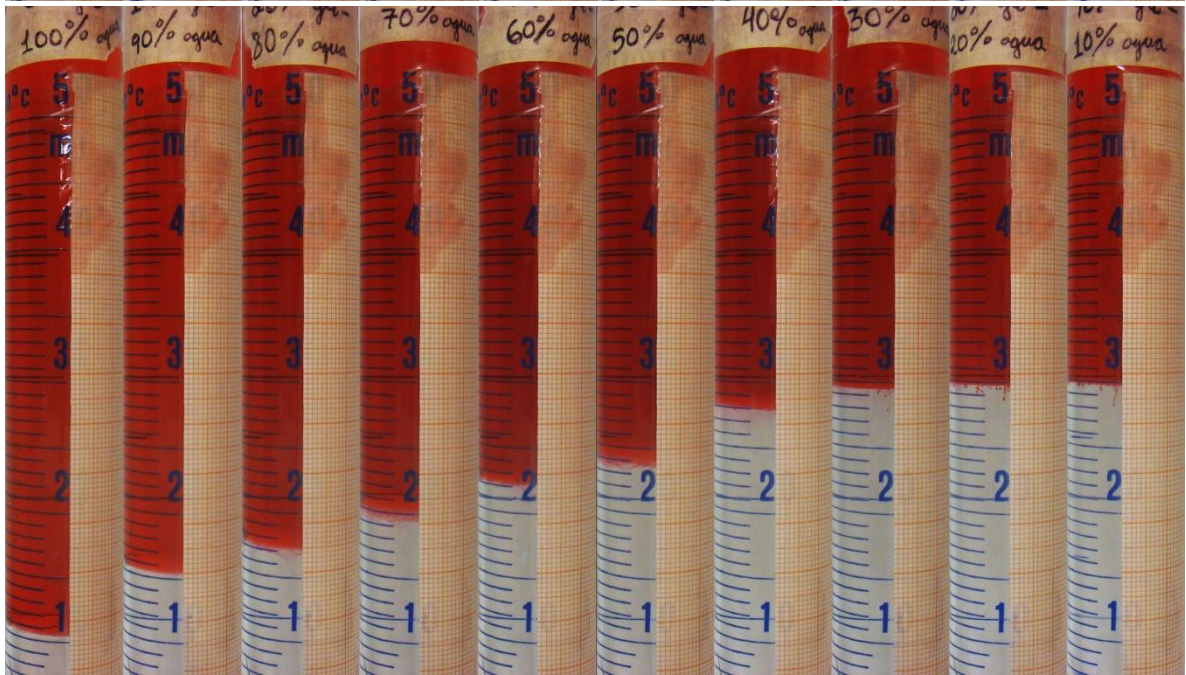
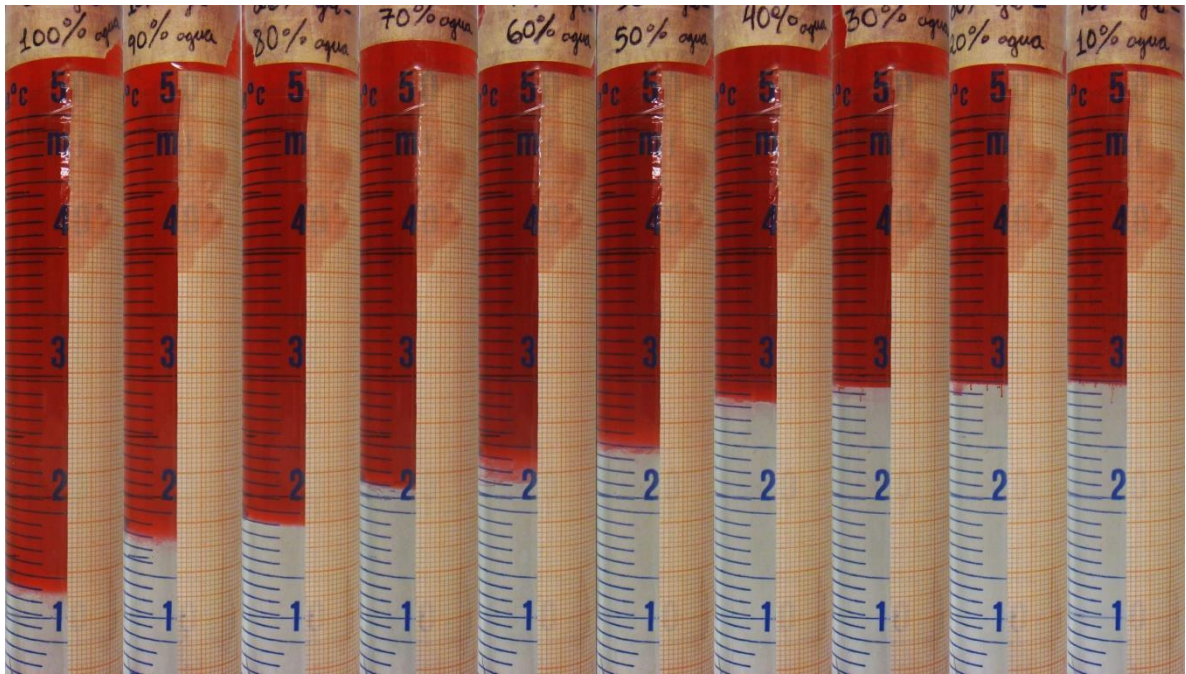


Figura 18. Desplazamiento adimensional de la interfase contra concentración, en condiciones dinámicas bruscas, para distintos tiempos







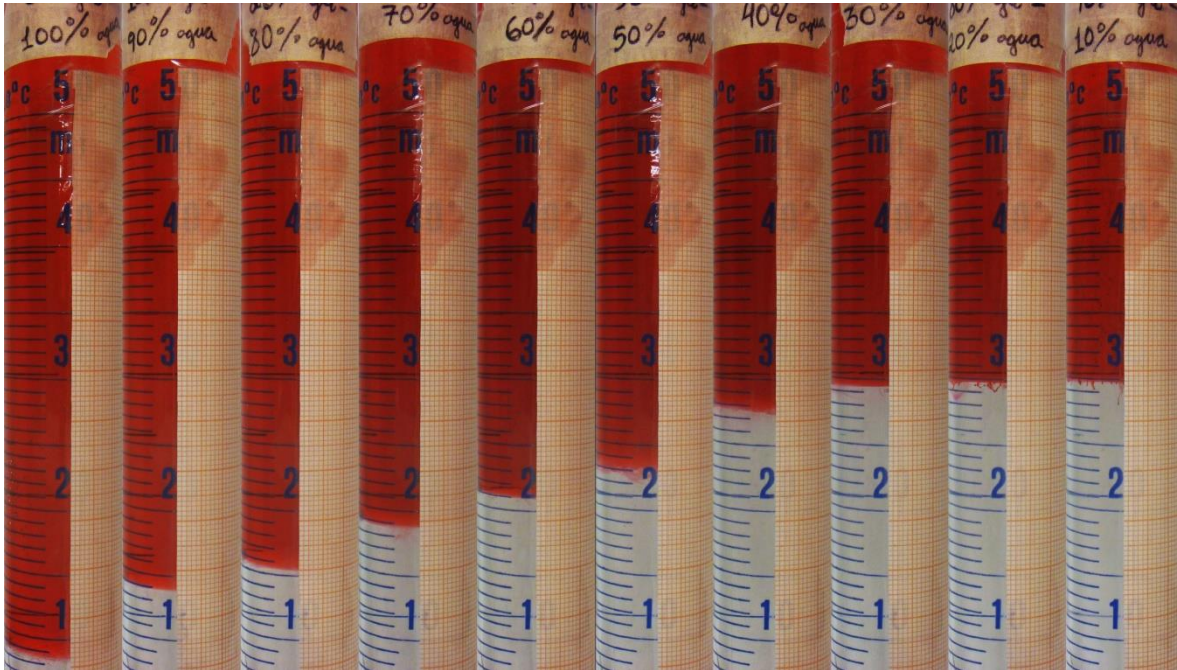


Figura 19. Serie (#5) de fotografías para el caso dinámico brusco. La concentración cambia desde 0% hasta 90% de glicerina, de 10% en 10%, de izquierda a derecha; y el tiempo cambia de 0 s hasta 240 s, de 60 s en 60 s, de arriba hacia abajo

Finalmente, la carta de difusión, que está en escala logarítmica tanto para el eje del tiempo (abcisas) o para el eje del desplazamiento adimensional (ordenadas), tal y como está hasta ahora, se ilustra en la figura 20, con polinomios de grado 1 para aproximar las líneas, y en la figura 21, con polinomios de grado 2 para la misma tarea. Las ecuaciones de los modelos aparecen en la gráfica misma, indicando la concentración de glicerina y el caso al cual corresponden (ej. 10-D significa el caso dinámico brusco para 10% de glicerina).

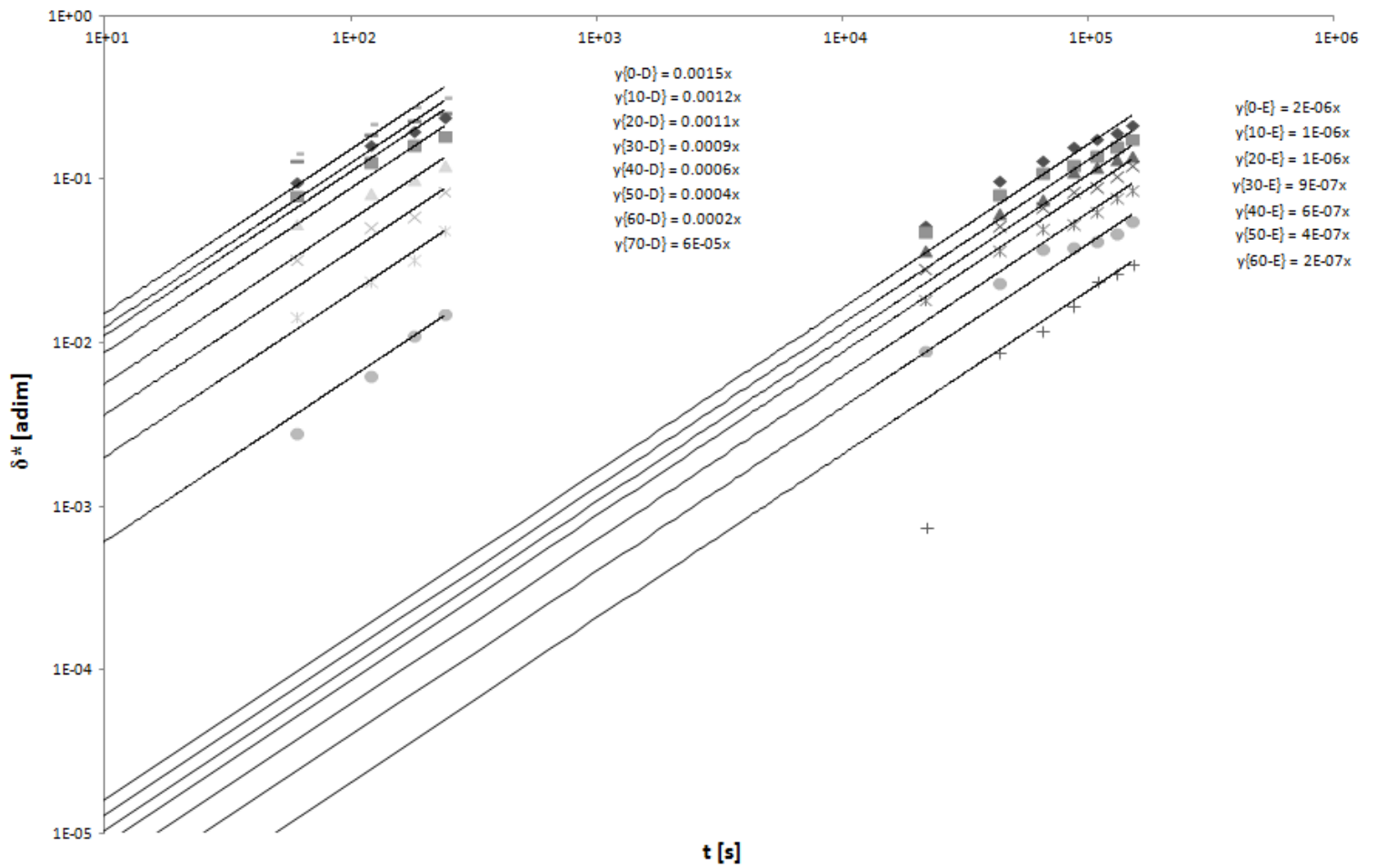


Figura 20. Desplazamiento adimensional de la interfase contra tiempo (polinomios de grado 1)



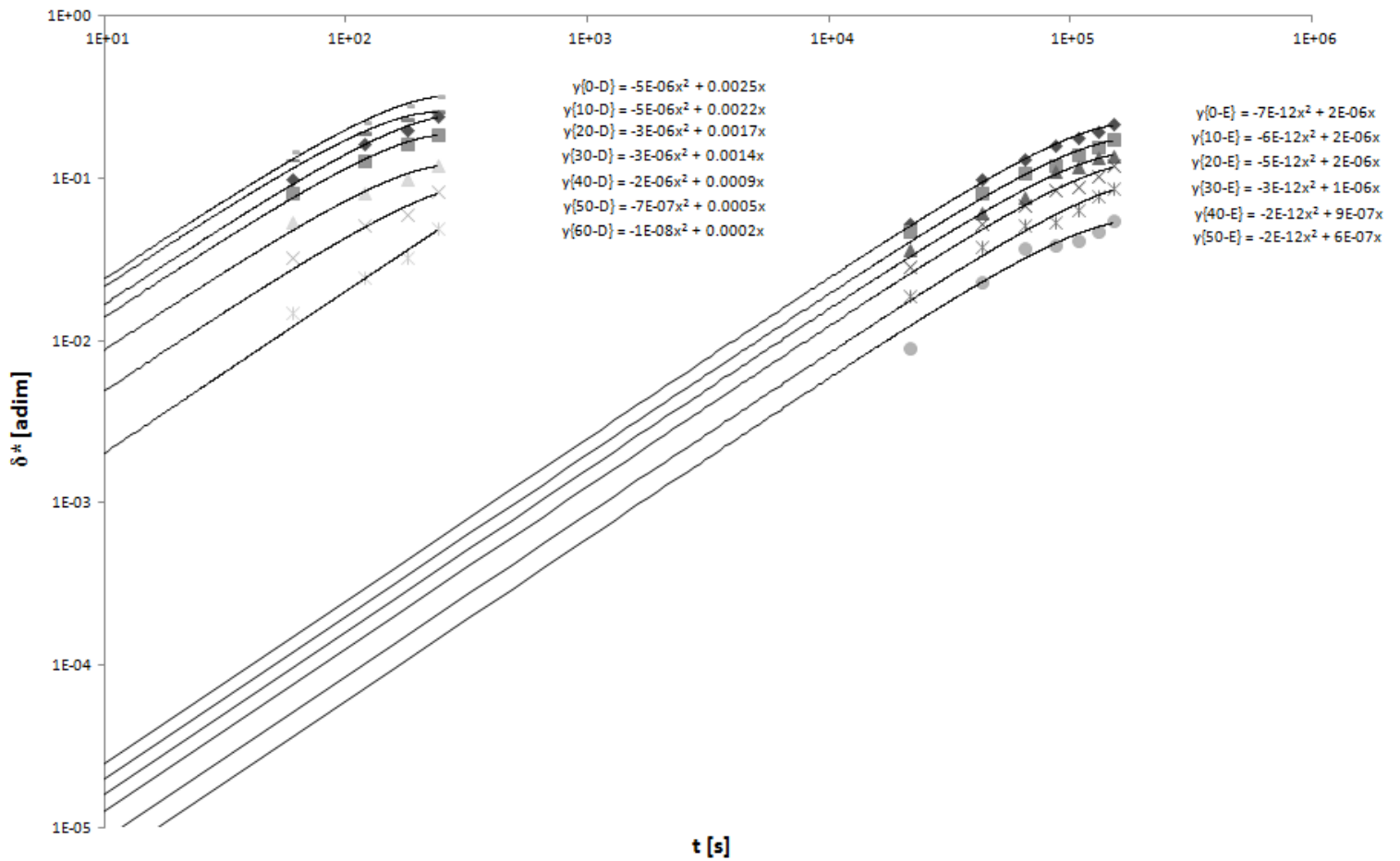


Figura 21. Desplazamiento adimensional de la interfase contra tiempo (polinomios de grado 2)

## Conclusiones preliminares

Se hicieron los siguientes hallazgos:

- El caso dinámico brusco presenta tiempos de difusión mucho más cortos ( $\sim 10^2$  s) que el caso estático ( $10^4$ - $10^5$  s).
  - Esto nos lleva a la hipótesis de que el caso dinámico suave, aunque no necesariamente sea el punto medio entre los otros dos casos, presentará tiempos de difusión intermedios ( $\sim 10^3$  s).
- A menor concentración de glicerina en la fase diluida, menores son los tiempos de difusión.
- Para una concentración de aproximadamente 70% glicerina o mayor en la fase diluida, los resultados muestran que prácticamente no hay desplazamiento de la interfase y, por lo tanto, se puede considerar a la mezcla inmiscible en los tiempos manejados.
- Es posible identificar un nivel objetivo de la interfase en el caso estático por medios ópticos y con ayuda del programa desarrollado. No obstante, en el caso dinámico brusco, debido a la agitación de la mezcla, se pueden observar “fibras” de fluido, o bien, algún otro tipo de difusión no homogénea, por lo que la identificación de la interfase debe de hacerse manualmente, haciendo consideraciones caso por caso.
- Los resultados se comportan de esta manera en la medida en la que solamente existan dos fases de fluido y que no se perturbe a la mezcla antes de comenzar la captura de imágenes, o bien, durante el proceso. La presencia de burbujas altera significativamente los resultados en el caso dinámico brusco.
- La descripción matemática del desplazamiento adimensional de la interfase se aproxima mejor a los resultados experimentales en el caso dinámico brusco que en el estático.
- En el caso estático, el comportamiento de  $z^*$  se puede describir razonablemente mediante polinomios de grado 1, mientras que el comportamiento de  $\delta^*$  se puede describir por mediante polinomios de grado 2.
- En el caso estático, el comportamiento de  $z^*$  y el de  $\delta^*$  se puede describir adecuadamente mediante polinomios de grado 2.

# Apéndice B

## DATOS

### B.1. Conductividad térmica para mezclas de líquidos

Los siguientes métodos de estimación para obtener la conductividad térmica de mezclas líquidas fueron recabadas de Poling et al. (2001).

#### **Correlación Jameison, et al.(1975)**

Investigación y evaluación de los datos en el *National Engineering Laboratory* sugiere que para mezclas binarias

$$\lambda_m = w_1\lambda_1 + w_2\lambda_2 - \alpha(\lambda_2 - \lambda_1)[1 - (w_2)^{1/2}]w_2 \quad (\text{B.1})$$

donde  $w_1$  y  $w_2$  son las fracciones en peso y como en el método de Filippov, los componentes son seleccionados  $\lambda_2 \geq \lambda_1$ ,  $\alpha$  es un parámetro ajustable que se establece igual a la unidad si los datos de mezcla no están disponibles para propósitos de regresión. Los autores indicaron que la ecuación B.1 permite estimar  $\lambda_m$  dentro de un 7% (con un 95% de límite de confianza) para todos los tipos de mezclas binarias con o sin agua. Sin embargo no puede ser utilizada para mezclas multi-componentes.

#### **Correlación Baroncini, et al.(1981, 1983, 1984)**

El método de Latini, et al. que es utilizado para la estimación de la conductividad térmica

de líquidos puros,  $\lambda_m = \frac{A(1-T_r)^{0.38}}{T_r^{1/6}}$  fue adaptada para tratar mezclas binarias de líquidos.

$$\lambda_m = \left[ x_1^2 A_1 + x_2^2 A_2 + 2.2 \left( \frac{A_1^3}{A_2} \right)^{1/2} x_1 x_2 \right] \frac{(1 - T_{rm})^{0.38}}{T_{rm}^{1/6}} \quad (\text{B.2})$$

donde  $x_1$  y  $x_2$  son las fracciones molares de los componentes 1 y 2, los parámetros A puede se introducir con  $A = \frac{A^* T_b^\alpha}{M^\beta T_c^\gamma}$  que se refiere al método de Latini. Para la temperatura reducida de la mezcla  $T_{rm} = T/T_{cm}$  donde

$$T_{cm} = x_1 T_{c1} + x_2 T_{c2} \quad (\text{B.3})$$

donde  $T_{c1}$  y  $T_{c2}$  son las temperaturas críticas de cada componente puro. La elección del componente 1 se basa con el criterio  $A_2 \geq A_1$ . Esta correlación ha sido puesto a prueba con más de 600 datos de 50 sistemas binarios incluyendo los que contienen componentes con polaridad alta. El error promedio es de 3%. Éste método no se aplica para mezclas multi-componentes.

### Power Law

Siguiendo a Vredeveld (1973), la siguiente ecuación puede usarse para sistemas no acuosos en los que la relación de conductividades térmicas de los componentes no excede de dos:

$$\lambda_m = \left( \sum_i w_i \lambda_i^{-2} \right)^{-1/2} \quad (\text{B.4})$$

donde  $w_i$  es la fracción en peso del componente y  $\lambda_i$  es la conductividad térmica de  $i$  puro, esta ecuación ha sido usada para sistemas binarios (Carmichael, et al., 1963) y sistemas ternarios (Rowley, 1988). Si se utiliza para binarias acuosas es insatisfactorio al tener desviaciones mayores al 10% (Rowley, 1988).