

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS SOBRE
EL COMPORTAMIENTO MAGNETOREOLÓGICO DE UN CRUDO PESADO**

**MARÍA PAULA MOSQUERA GONZALEZ
CAROLINA ORTIZ ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS SOBRE
EL COMPORTAMIENTO MAGNETOREOLÓGICO DE UN CRUDO PESADO**

**MARÍA PAULA MOSQUERA GONZÁLEZ
CAROLINA ORTIZ ROJAS**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

**ARLEX CHAVES GUERRERO
Doctor en Ingeniería Química**

Codirector

**MARÍA DANIELA CONTRERAS MATEUS
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

A Dios por su infinito amor y su eterna compañía.

A mis amados padres Nancy y Carlos por su apoyo incondicional, su incansable esfuerzo y por ser la principal motivación para cumplir todos mis propósitos.

A mí amado Hermano, y compañero de vida, por creer siempre en mí.

A mi abuelita Lía, por ser luz en mi camino y portadora de sabios consejos, gracias por todo el amor brindado.

A mi familia, por estar siempre atenta a mi proceso, por hacerme parte de sus oraciones día a día, por darme el cariño más sincero.

A mis grandes amigos Samuel, Juliana y Andrés, por todos los consejos brindados, por ser esa voz de aliento en los momentos difíciles.

A mis profesores y compañeros, por todas las experiencias vividas, por hacer enriquecedor e inolvidable mí paso por la universidad.

María Paula

A Dios, por ser mi luz y esperanza todos los días de mi vida, por su amor inagotable y por llenar mi corazón de felicidad.

A mi hermosa hija, por ser mi motor, mis ganas de seguir adelante y enfrentar cada obstáculo del camino, por ser el amor de mi vida.

A mis padres, por su apoyo incondicional en cada paso y por el gran esfuerzo en hacer de mí una mejor persona día a día, por sus consejos, por ser los mejores amigos.

A mi familia, por el ánimo, cariño y amor brindado.

A mis compañeros y profesores, por compartir sus enseñanzas, experiencias y momentos inolvidables que dejan en mí una huella imborrable.

Gracias

Carolina

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Director Arlex Chaves y codirectora Daniela Contreras por su permanente apoyo, dedicación y orientación durante el desarrollo de esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander y al laboratorio de Reología y Fluidos Complejos de la Universidad, por su apoyo y permitir avanzar en la investigación de nuevas tecnologías en el aseguramiento de flujo de hidrocarburos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 GENERALIDADES DE CRUDOS	19
1.2 REOLOGÍA DE CRUDOS.....	20
1.3 VISCOELASTICIDAD	20
1.3.1 Caracterización de fluidos viscoelásticos.....	20
1.4 FERROFLUIDOS.....	23
2. METODOLOGÍA	25
2.1 MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1.1 Materiales	25
2.1.2 Pretratamiento del crudo.....	26
2.1.3 Preparación de ferrofluido y mezcla ferrofluido-crudo.....	26
2.1.4 Evaluación reológica	27
2.1.5 Evaluación magneto-reológica.....	28
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
3.1 MODELACIÓN REOLÓGICA.....	31
3.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO	32
3.3 EFECTO DE INCLUSIÓN DE SOLVENTE (KEROSENE) EN CRUDO.....	35
3.4 EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE NANOPARTÍCULAS	38
3.5 EVALUACIÓN MAGNETOREOLÓGICA.....	40
3.5.1 Comportamiento inducido por el campo magnético	40
3.5.2 Efecto magneto-viscoso y de cizalla.	42
3.5.3 Análisis del comportamiento viscoelástico.....	44
4. CONCLUSIONES	45

5. RECOMENDACIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
BIBLIOGRAFIA.....	54
ANEXOS.....	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ilustración de un ferrofluido.....	23
Figura 2. Esquema de metodología adoptada para el desarrollo del proyecto de investigación	25
Figura 3. Comportamiento de la viscosidad en función de la velocidad de corte del crudo pesado.	32
Figura 4. G' y G'' en función de la amplitud porcentual del crudo pesado, crudo diluido y crudo diluido tratado con 5% de nanopartículas a 25°C.	33
Figura 5. G' y G'' en función de la temperatura del crudo pesado, crudo diluido y crudo diluido tratado con 5% de nanopartículas.	34
Figura 6. Comportamiento de la viscosidad en el tiempo (crudo y patrón k-20%).	36
Figura 7. Comportamiento de viscosidad en el tiempo (patrones)	37
Figura 8. Evaluación del efecto de nanopartículas en el crudo pesado y su comparación respecto al patrón.....	39
Figura 9. Comportamiento de la viscosidad en función del tiempo por efecto de un campo magnético de 0,72 T en muestras con nanopartículas de 0,2 y 5% p/p.	42
Figura 10. Curva de muestra con nanopartículas al 5% p/p de viscosidad en función del campo magnético sometida a 1, 25 y 70 s ⁻¹	43
.....	43
Figura 11. Curva de módulos de pérdida y almacenamiento en función del campo magnético (patrón k-20%, crudo y nanopartículas 5% p/p)	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación de crudo de acuerdo a su gravedad API.....	19
Tabla 2. Diseño de experimentos	30

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Aplicaciones de los ferrofluidos.....	61
ANEXO B. Condiciones de operación típicas del transporte por oleoducto de crudos pesados colombianos	62
ANEXO C. Flujo de campo magnético de la celda magnética en función de la intensidad de corriente.....	64
ANEXO D. Análisis térmico.....	65
ANEXO E. Modelos reológicos	69
ANEXO F. Curvas en estado transitorio con campo magnético.....	70
ANEXO G. Muestra patrón a campo magnético: Ajuste viscosidad efectiva.	72

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO MAGNETOREOLÓGICO DE UN CRUDO PESADO*

AUTORES: MARÍA PAULA MOSQUERA GONZÁLEZ**
CAROLINA ORTÍZ ROJAS

PALABRAS CLAVES: Crudo pesado, nanopartículas, viscosidad, ferrofluido, magneto-reología, reología.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo principal de este proyecto es evaluar el efecto de la inclusión de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) y la exposición de campos magnéticos sobre el comportamiento reológico de un crudo pesado colombiano. Se utilizó kerosene como diluyente de crudo y medio dispersante de las nanopartículas en una proporción 20 %p/p. En la experimentación se analizaron cinco diferentes concentraciones de nanopartículas entre 0 y 5% p/p ejerciendo campos magnéticos de 0.3, 0.4 y 0.5 T isotérmicamente a 25°C. Se evaluó el comportamiento reológico del crudo con base en la concentración de nanopartículas, la intensidad y tiempo de la exposición del campo magnético y la razón de deformación.

De acuerdo a los resultados, la simple inclusión de nanopartículas magnéticas disminuye la viscosidad del crudo, además de la reducción por efecto del solvente. La concentración que obtuvo un mayor porcentaje de reducción fue 0.2% p/p alcanzando un 35%. Los estudios también revelaron que, la adición de las nanopartículas bajo la influencia de un campo magnético estático, aumentan la viscosidad y la estabilidad del fluido debido a la formación de aglomerados que se forman en la microestructura por la interacción entre partículas y el campo magnético.

El protocolo de inclusión de nanopartículas fue exitoso, teniendo en cuenta que se logró la estabilización de éstas en el crudo diluido con kerosene al 20%p/p durante el periodo de experimentación. Esto pudo comprobarse al evidenciar un efecto magneto reológico en las muestras y la ausencia de precipitación de micro agregados.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor en Ingeniería Química. Codirectora: María Daniela Contreras Mateus, Ingeniera Química

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF MAGNETIC NANOPARTICLES OVER THE MAGNETORHEOLOGICAL BEHAVIOR FROM A HEAVY CRUDE OIL.*

AUTHORS: MARIA PAULA MOSQUERA GONZALEZ**
CAROLINA ORTIZ ROJAS

KEYWORDS: Heavy crude oil, nanoparticles, viscosity, ferrofluid, magnetorheology, rheology.

DESCRIPTION:

The main objective of this investigation is to evaluate the addition of magnetic nanoparticles effect in the rheology behavior of a heavy crude oil which is also treated with magnetic fields. The carrier fluid of the nanoparticles was 20% w/w kerosene. In the experimentation were analyzed five different dosages of nanoparticles between 0 and 5%w/w exerting magnetic fields of 0.3, 0.4 and 0.5 T. These were measure isothermally at 25 °C. The rheological behavior evaluation is based on nanoparticles concentration, the field intensity, pulse duration, and shear rate.

According to the results the simple nanoparticles addition decrease the crude oil viscosity, besides the crude oil dilution with kerosene. The concentration that obtained the highest viscosity reduction degree was 0.2% w/w reaching 35%. The study also reveals that the inclusion of nanoparticles under the influence of a static magnetic field increases the viscosity and stability of the fluid due to the formation of agglomerates in the microstructure by the interaction between particles and the magnetic field.

The inclusion protocol of nanoparticles was successful, taking into account that the stabilization of these was achieved in the diluted crude with kerosene at 20% w / w during the experimental period. This could be verified by evidencing a magneto-rheological effect in the samples and the absence of precipitation of micro aggregates.

* Degree work

** Physico-chemical engineering faculty. School of Chemical Engineering. Director: Arlex Chaves Guerrero, PhD in Chemical Engineering. Co-director: María Daniela Contreras Mateus, Chemical Engineer

INTRODUCCIÓN

La declinación de reservas de crudos convencionales en Colombia y la caída de los precios en el mercado internacional, hacen necesaria la búsqueda de estrategias para mantener la autosuficiencia petrolera. Una de las estrategias es la producción de crudos no convencionales o pesados, que representan aproximadamente el 70% de las reservas mundiales de crudo. Según estudios realizados por Campetrol, Colombia posee el 0.6% de estas reservas mundiales con un 55% de reservas de crudo pesado [1]. Estos crudos presentan elevadas viscosidades (>103 cP a 298.15°C), concentraciones considerables de asfaltenos, hetero átomos y metales [2], [3], lo que dificulta su transporte por tubería. Las técnicas convencionales que se han utilizado para mitigar los problemas de flujo se clasifican en tres grandes grupos: i) reductoras de arrastre ii) In-situ (procesos térmicos) y iii) reductoras de viscosidad [2] [3] [4]. Sin embargo, estas tecnologías aún presentan problemas en su implementación, y/o incrementan los costos operacionales. En la industria del gas y petróleo, se ha venido investigando en posibles aplicaciones de la nanotecnología en campos como la exploración, producción, refinación, transporte y tratamiento de aguas entre otros [6]. Recientemente, se ha demostrado que la nanotecnología y la aplicación de campos electromagnéticos pueden ser una alternativa a las actuales técnicas usadas en el aseguramiento de flujo. Por ejemplo, se ha encontrado que diferentes tipos de nanopartículas metálicas pueden interactuar con las fracciones más pesadas del crudo alterando sus propiedades reológicas facilitando su transporte [3][5].

En este sentido, Taborda *et al.* evaluaron, la influencia de nanopartículas de SiO_2 sobre el comportamiento viscoelástico de crudos pesados colombianos para el mejoramiento de transporte por tubería y observaron reducciones en la viscosidad de hasta un 45% [8]. También se han empleado nanopartículas de Al_2O_3 en la

adsorción de asfaltenos [9]. En cuanto a la aplicación de nanopartículas magnéticas, estudios han indicado que las nanopartículas de óxidos de hierro tienen efecto positivo en la reducción de la viscosidad de crudos (Kothari, Raina, Chandak, Iyer, & Mahajan, 2010) [10]. Cortés *et al.* [7], evaluaron el efecto de una suspensión de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) en aceite lubricante de motor reciclado sobre la reducción de viscosidad de un crudo pesado colombiano. Se observó que las nanopartículas (en ausencia de un campo magnético) adsorben los asfaltenos disminuyendo el tamaño de sus agregados e impidiendo la formación de una red viscoelástica; este efecto se tradujo en una reducción de la viscosidad entre el 70 y 80%.

Otra alternativa potencial es la aplicación de campos magnéticos en crudos pesados. Según estudios previos, campos magnéticos pueden alterar el valor de la viscosidad, el comportamiento viscoelástico y el fenómeno de cristalización de parafinas en crudos livianos [11] [12] [13] [14] [15] [16]. Se ha determinado como factores importantes para la eficiencia del tratamiento magnético, su intensidad y el tiempo de exposición al campo [24]. Por ejemplo, Homayuni *et al.* [34], reportó la disminución de la viscosidad de crudos pesados bajo campos magnéticos de baja intensidad (0,03 a 0,3 T) y corta duración (5 a 600 s) que fue atribuido principalmente al efecto de éste sobre la distribución de tamaño de las partículas de asfaltenos. Según Thomas (1965) y Matsumoto & Sherman (1969), la agregación de pequeñas partículas dentro de una suspensión líquida a fracciones volumétricas constantes, reflejarían una reducción en la viscosidad [17], esta agregación normalmente se logra debida exposición del fluido a un campo magnético o un campo eléctrico [16].

En el caso del campo magnético aplicado a suspensiones con partículas magnéticas, se puede apreciar que hay algún tipo de interacción [16]; si dicha interacción llega a ser lo suficientemente fuerte para superar la energía térmica y el movimiento browniano, se da la formación de cadenas de partículas orientadas

en la dirección del campo [16]. Sin embargo, si la interacción se prolonga por tiempos muy largos, las partículas se pueden agregar en resistentes cadenas macroscópicas aumentando la viscosidad del fluido [16]. Estos resultados fueron validados Homayuni *et. al.*, quienes aplicaron esta teoría como fundamento físico en el tratamiento de crudos pesados, basándose en la naturaleza coloidal de los crudos de grandes partículas suspendidas, en su mayoría de origen asfáltica; llegando a la conclusión que hay un aumento en la viscosidad del crudo cuando éste se expone a tiempos largos de campo magnético, mientras que los pulsos cortos registran disminuciones considerables [16].

Ahora bien, la incorporación de nanopartículas magnéticas a crudos pesados y la aplicación de un campo magnético podría intensificar la interacción nanopartícula-nanopartícula y de fluido en general, haciéndolo más sensible y potencializando su efecto sobre el comportamiento reológico. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) sobre el comportamiento magneto-reológico de un crudo pesado, basándose o asemejándose en las capacidades que un ferrofluido tiene, pues existe evidencia experimental de manipular el comportamiento reológico de ferrofluidos por campos magnéticos de diferentes configuraciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES DE CRUDOS

El petróleo crudo es una mezcla compleja que se compone de 200 o más componentes orgánicos, en gran parte por alcanos y pequeñas fracciones de aromáticos. Todos los crudos contienen diferentes combinaciones y concentraciones de estos compuestos. La gravedad API (American Petroleum Institute) de un crudo es la medida de su gravedad específica o densidad y es ampliamente utilizada en la industria del petróleo. De acuerdo con este parámetro, los crudos pueden clasificarse de la siguiente manera.

Tabla 1 Clasificación de crudo de acuerdo a su gravedad API

Tipo de Crudo	° API	Tipo de crudo	° API
Liviano	>30	Pesado	10-21,9
Mediano	22-29,9	Extra pesado	<9,9

Fuente: Fundamentos de ingeniería de yacimientos, 2013.

Aparte de la gravedad API, los crudos pueden ser clasificados por otras características como su lugar de origen, composición química, presencia de azufre, entre otros.

1.2 REOLOGÍA DE CRUDOS

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de fluidos complejos como polímeros, suspensiones, pastas, alimentos etc. [19] El entendimiento del comportamiento reológico de estos fluidos es fundamental en procesos de manufactura, para mejorar la eficiencia en transporte y almacenamiento o uso [20]. Los fluidos pueden clasificarse en dos grupos: Newtonianos y no Newtonianos [19]. Los primeros son aquellos que muestran una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la razón de deformación. Sin embargo, la gran mayoría de los fluidos en la industria de procesos presentan un comportamiento no Newtoniano. Dentro de los fluidos no Newtonianos, podemos realizar una división según su comportamiento: no Newtonianos independientes del tiempo, los cuales se caracterizan por que la viscosidad depende de la razón de deformación y cuya ecuación constitutiva para los esfuerzos es dada por modelos Generalizados de Newton. No Newtonianos dependientes del tiempo (tixotrópicos y reopécticos) y fluidos viscoelásticos que tiene un comportamiento reológico caracterizado por respuestas viscosas y/o elástica que se manifiestan dependiendo de la forma en que es aplicado el esfuerzo (rápido o lento). En el caso de crudos livianos y pesados se ha reportado comportamientos reológicas que van desde el Newtoniano hasta el viscoelástico.

1.3 VISCOELASTICIDAD

1.3.1 Caracterización de fluidos viscoelásticos. La caracterización de un fluido viscoelástico se realiza utilizando tres tipos de ensayos: ensayos estáticos, cuyo objetivo es observar el comportamiento del material por largos periodos de carga[20][21]; de transición, aplicados comúnmente en periodos de carga cortos y

oscilatorios. Éstos últimos se describirán detalladamente, pues son los que se emplearon en este trabajo de investigación:

Los ensayos rotacionales se caracterizan por que la deformación (γ , "strain") aplicada al material es sinusoidal con una amplitud de deformación constante γ_o , y una frecuencia angular ω , representada por la ecuación (1).

$$\gamma(t) = \gamma_o \sin(\omega t) \quad (1)$$

Mientras que la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$, Strain rate o "Shear rate") está dada por la ecuación (2).

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_o \omega \cos(\omega t) \quad (2)$$

Donde $\dot{\gamma}_o = \gamma_o \omega t$. Sin embargo, cuando se garantiza un valor bajo de deformación γ_o o altas viscosidades, el esfuerzo generado sobre el material será una onda sinusoidal de igual frecuencia a la deformación aplicada, pero por lo general desfasada por un ángulo.

$$\tau(t) = \tau_o \sin(\omega t + \delta) \quad (3)$$

Aplicando una identidad trigonométrica para expandir la ecuación (3) se obtiene:

$$\tau(t) = \tau_o \cos \delta \sin(\omega t) + \tau_o \sin \delta \cos(\omega t) \quad (4)$$

Lo importante de la anterior expresión es que demuestra que el esfuerzo generado en el material está compuesto de dos partes: i) una parte que está en fase con la deformación (γ) ii) y otra en fase con la razón o velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$). Adicionalmente, se conoce que, en un sólido elástico ideal, la tensión resultante es proporcional a la amplitud de la deformación (según la ley de Hooke) y las señales sinusoidales de tensión y deformación están en fase. Si la muestra se comporta

como un fluido viscoso ideal, entonces la tensión es proporcional a la velocidad de deformación y las señales se encuentran desfasadas, siendo la diferencia entre los ángulos de fase igual a 90° . Basados en estos conceptos se ha definido las siguientes funciones materiales para esfuerzos oscilatorios de pequeña amplitud (SAOS, por sus siglas en inglés) llamadas módulos de almacenamiento y pérdida los cuales se definen de la siguiente manera:

SAOS material functions	$\frac{-\tau_{21}}{\gamma_0} = G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t$	(5)
-------------------------	--	-----

Módulo de almacenamiento	$G'(\omega) \equiv \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta$	(6)
--------------------------	---	-----

Módulo de pérdida	$G''(\omega) \equiv \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta$	(7)
-------------------	--	-----

Por lo tanto, para un fluido Newtoniano (viscoso ideal) $G''=0$, $G'=\mu\omega$ y $\delta=90^\circ$, para un sólido elástico ideal (o Hookeano) $G'=G$, $G''=0$ y $\delta=0^\circ$, mientras que para fluidos visco-elásticos bajo una prueba SAOS $G' \neq 0$, $G'' \neq 0$ y $0 < \delta < 90$. En la literatura especializada en reología, se definen otras funciones materiales para SAOS, sin embargo, estos otros no dan información adicional a los módulos de pérdida y almacenamiento.

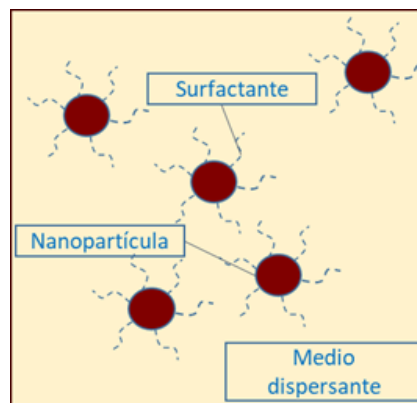
También se sabe, que a temperaturas por encima del punto de cristalización, el crudo presenta un comportamiento newtoniano con viscosidades relativamente bajas, por tanto, sobre este rango de temperatura, G'' presenta valores mucho mayores que el G' . Por el contrario, al descender la temperatura a valores por debajo del punto de cristalización, se favorece la precipitación de parafinas, causando un aumento en el valor del módulo de almacenamiento, hasta exceder los valores del módulo de pérdida ($G' > G''$), lo que indica, que el comportamiento elástico del fluido empieza a predominar. El punto en el cual los módulos se interceptan ($G' = G''$), se conoce como punto de gel [23]. A temperaturas por debajo del punto de gel, el comportamiento se empieza a asemejar más al de un

sólido que al de un líquido, debido al aumento en la precipitación de parafinas y, en consecuencia, el esfuerzo requerido para restablecer el flujo es mucho mayor [23].

1.4 FERROFLUIDOS

Un ferrofluido es una suspensión coloidal compuesta por nanopartículas ferromagnéticas que se encuentran en un medio dispersante o líquido portador (usualmente es un solvente orgánico o agua). Para evitar la aglomeración de partículas en la suspensión, las nanopartículas por lo general están recubiertas por un surfactante o en algunos casos sus superficie son cargadas eléctricamente [10][24]. Los ferrofluidos tienen la gran capacidad de polarizarse fácilmente ante de un campo magnético externo debido a que las nanopartículas son superparamagnéticas, es decir, tienden a alinear su momento magnético en la misma dirección del campo aplicado lo que les confiere comportamientos reológicos imposibles de obtener con fluidos convencionales [17].

Figura 1. Ilustración de un ferrofluido.



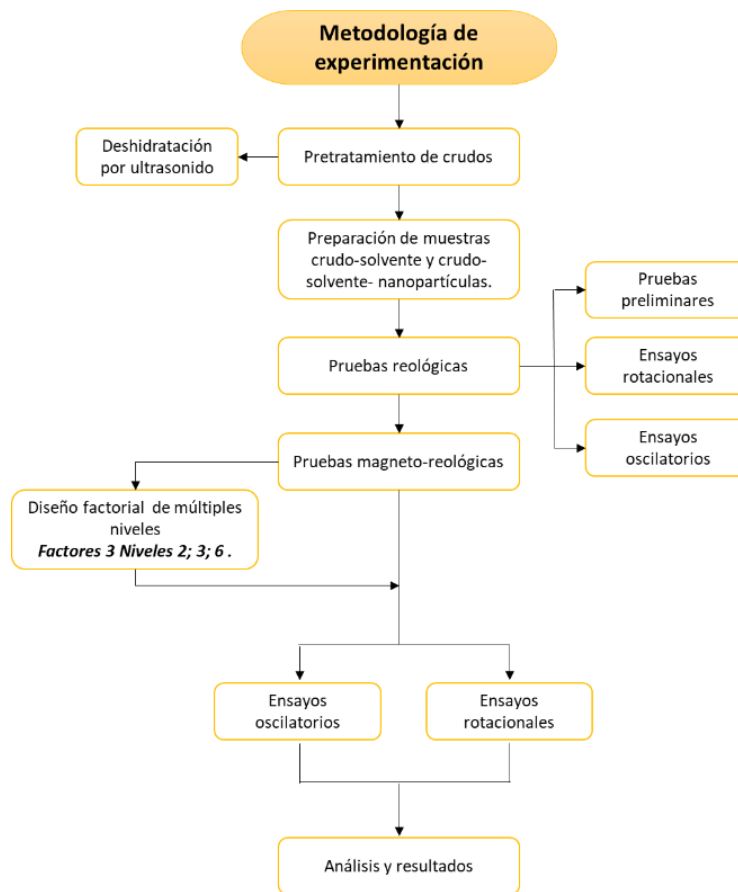
Los ferrofluidos son actualmente usados en múltiples aplicaciones tanto biológicas como mecánicas (Ver Anexo A para conocer más aplicaciones de los ferrofluidos).

2. METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describen los materiales, equipos y metodología implementada para el desarrollo de este proyecto de investigación. La figura 3, representa la secuencia y relación de las técnicas llevadas a cabo.

Figura 2. Esquema de metodología adoptada para el desarrollo del proyecto de investigación



2.1.1 Materiales. Para la investigación se usó un crudo pesado deshidratado de 12.8 °API[25]. Las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) fueron adquiridas de Ferrotec USA Company. Éstas poseen un recubrimiento de un surfactante polimérico, tienen un contenido de óxido de hierro (60-80 p/p%) y diámetro nominal de partícula (10 nm). Con el fin de lograr una adecuada suspensión de las nanopartículas en el crudo, primero se dispersaron en Kerosene [26][27] formando un Ferrofluido en base aceite el cual posteriormente fue agregado al crudo hasta formar una mezcla la cual llamaremos ferrofluido- crudo.

2.1.2 Pretratamiento del crudo. El crudo empleado se deshidrató para asemejar las condiciones de transporte por oleoducto y para obtener medidas repetibles al realizar los ensayos en el reómetro. El crudo se deshidrató mediante la técnica de ultrasonido durante 36 horas y posteriormente se decantó.

2.1.3 Preparación de ferrofluido y mezcla ferrofluido-crudo. La suspensión ferrofluido-crudo fue preparada con base en estudios previos [26][28]. Se trabajaron muestras con concentración de nanopartículas entre 0.1 y 5 p/p% con respecto a la mezcla crudo-kerosene. Para evaluar el efecto neto de las nanopartículas, se tomó como referencia una muestra patrón o patrón k-20% (crudo-kerosene sin nanopartículas), esta fue la base de la preparación de todas las suspensiones.

Para la preparación se empleó el siguiente procedimiento [29]: (i) se agregaron las nano partículas en 4.9 ml de kerosene (20%p/p respecto al crudo) (ii) se realizó agitación manual y luego se llevó a tratamiento ultrasónico por 10 minutos (iii) la mezcla se sometió a agitación mecánica a 160 rpm y 40 °C por 1 h. (iv) Una vez preparada la mezcla kerosene-nanopartículas o ferrofluido, se añadieron 20 g de crudo y por último se llevó nuevamente a agitación mecánica por 24 horas para asegurar la homogeneidad completa de la muestra final.

2.1.4 Evaluación reológica. La caracterización reológica se llevó a cabo en un reómetro Anton Paar Physica MCR 302, equipado con una celda magneto-reológica MRD170/1T con un baño térmico (Julabo F 32) para el control de temperatura. La geometría usada es de platos paralelos de 20 mm de diámetro.

Todos los experimentos se realizaron usando una distancia entre platos de 1 mm y temperatura de 25 °C. Antes de iniciar cada ensayo, la muestra permaneció entre los platos por 30 minutos para asegurar la homogenización de la temperatura. Esta evaluación se desarrolló con el fin de determinar el efecto de la inclusión del disolvente y las nanopartículas en el comportamiento reológico del crudo. Las pruebas reológicas usadas fueron rotacionales y oscilatorias.

2.1.4.1 Ensayos rotacionales

- **Curvas de viscosidad contra razón de deformación:** el crudo pesado, el patrón-k 20% y las muestras ferrofluido-crudo se ensayaron a diferentes velocidades de deformación, mediante una rampa logarítmica de 1 a 100 s⁻¹ por 3 minutos.
- **Curvas de flujo transitorio:** Se realizaron pruebas de viscosidad contra tiempo (30 minutos) a una velocidad de deformación constante de 25 s⁻¹. El valor de velocidad de formación seleccionado, corresponde a la velocidad de deformación promedio calculada a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille (asumiendo comportamiento reológico Newtoniano) y usando el flujo volumétrico típico de crudo en diversos segmentos del oleoducto OCENSA. (ver en Anexo B la ecuación de Hagen-Poiseuille e información relacionada).

2.1.4.2 Ensayos oscilatorios (SAOS): Se evaluó la modificación de las propiedades viscoelásticas del crudo por la inclusión de kerosene y nanopartículas. Previo a cada ensayo se mantuvo la respectiva muestra a una temperatura constante de 25°C durante 30 minutos para asegurar la homogenización térmica. Inicialmente, se efectuó un barrido de amplitud en el rango de 0,01 a 100% a una temperatura y frecuencia constantes de 25 °C y 10 rad/s, con el fin de cuantificar la componente elástica y determinar la zona viscoelástica lineal (en caso de presentar comportamiento viscoelástico). Posteriormente, se midieron los módulos en función de la temperatura aplicando una rampa lineal de enfriamiento de 25°C hasta -5°C, bajo un esfuerzo oscilatorio de 0,1% y 10 rad.

2.1.5 Evaluación magneto-reológica. Se empleó la celda magneto-reológica equipada con una fuente de alimentación de corriente que genera una densidad de flujo de campo magnético uniforme y perpendicular al flujo hasta de 1 T entre los platos sin muestra. El rango de corriente operable de la celda es de 0 a 5 A. En el Anexo D se muestra un ajuste de la densidad de flujo magnético en función de la corriente. Para cada una de las mezclas crudo-ferrofluido y el patrón crudo-kerosene fueron ensayadas para obtener curvas de viscosidad contra tiempo mientras era sometida al campo magnético. El tiempo de exposición y la densidad de flujo magnético fueron variados.

2.1.5.1. Análisis térmico: Teniendo en cuenta que la celda magnetoreológica está diseñada de forma tal que el “coil” usado para generar el campo magnético podría afectar la temperatura de la muestra; además de que la viscosidad de los crudos es altamente dependiente de la temperatura, se realizó un análisis térmico para descartar o corregir aumento de la temperatura durante la exposición al campo. Este consistió en la toma de fotografías térmicas a la celda con y sin muestras, antes y después de una exposición al campo con 5 A de corriente. Se empleó una cámara termográfica (FLIR) que capta un rango de temperatura de –

20°C a 200°C con una sensibilidad térmica menor a 0,15°C. El análisis se realizó a la muestra de crudo involucrada en esta investigación y muestras de diferentes fluidos (agua, aceite mineral). Éste permitió establecer el incremento de temperatura en cada de uno de los casos. Adicionalmente, y con la finalidad de contrarrestar el incremento no deseado de la temperatura, se acondicionó una termocupla PT-100 que mide la temperatura de la celda directamente y envía la señal al baño térmico, éste, a su vez, realiza el control externo de temperatura. (Ver Anexo D para profundizar el análisis térmico).

2.1.5.2 Ensayos rotacionales: Se realizó un diseño de experimentos con los siguientes factores: 1). El tiempo de exposición (t), 2). La intensidad de corriente (i) y 3). La concentración de nanopartículas (c). La tabla 3 muestra los niveles empleados para cada factor, se utilizaron las condiciones iniciales descritas en la caracterización reológica (acondicionamiento térmico y calibración del equipo).

- **Curvas de flujo transitorio:** El análisis en flujo transitorio se dividió en tres etapas: 1) En ausencia de campo magnético, midiendo la viscosidad durante 10 minutos y a una velocidad de deformación constante de 25 s^{-1} (que se mantuvo durante todo el experimento); 2) Con campo magnético, empleando los factores y niveles del diseño de experimentos (3 factores con 2,3 y 6 niveles, ver tabla 2) y 3) Recuperación en ausencia de campo, empleando un tiempo de 30 minutos para analizar la permanencia del efecto luego de la exposición.
- **Curvas de flujo en función del campo magnético:** Para evaluar el efecto magneto-viscoso, se hicieron mediciones de viscosidad en función del campo magnético a diferentes velocidades de deformación (1, 25 y 70 s^{-1}).

Tabla 2. Diseño de experimentos

% Nanopartículas	Intensidad de corriente[A]					
	2A		3A		4A	
	2,5[min]	5 [min]	2,5[min]	5 [min]	2,5 [min]	5[min]
0%	¹⁾ 0% ; 2A; 2,5 [min]	⁷⁾ 0% ; 2A; 5 [min]	¹³⁾ 0% ; 3A; 2,5 [min]	¹⁹⁾ 0% ; 3A; 5 [min]	²⁵⁾ 0% ; 4A; 2,5 [min]	³¹⁾ 0% ; 4A; 5 [min]
0,1%	²⁾ 0,1% ; 2A; 2,5 [min]	⁸⁾ 0,1% ; 2A; 5 [min]	¹⁴⁾ 0,1% ; 3A; 2,5 [min]	²⁰⁾ 0,1% ; 3A; 5 [min]	²⁶⁾ 0,1% ; 4A; 2,5 [min]	³²⁾ 0,1% ; 4A; 5 [min]
0,2%	³⁾ 0,2% ; 2A; 2,5 [min]	⁹⁾ 0,2% ; 2A; 5 [min]	¹⁵⁾ 0,2% ; 3A; 2,5 [min]	²¹⁾ 0,2% ; 3A; 5 [min]	²⁷⁾ 0,2% ; 4A; 2,5 [min]	³³⁾ 0,2% ; 4A; 5 [min]
0,6%	⁴⁾ 0,6% ; 2A; 2,5 [min]	¹⁰⁾ 0,6% ; 2A; 5 [min]	¹⁶⁾ 0,6% ; 3A; 2,5 [min]	²²⁾ 0,6% ; 3A; 5 [min]	²⁸⁾ 0,6% ; 4A; 2,5 [min]	³⁴⁾ 0,6% ; 4A; 5 [min]
1%	⁵⁾ 1% ; 2A; 2,5 [min]	¹¹⁾ 1% ; 2A; 5 [min]	¹⁷⁾ 1% ; 3A; 2,5 [min]	²³⁾ 1% ; 3A; 5 [min]	²⁹⁾ 1% ; 4A; 2,5 [min]	³⁵⁾ 1% ; 4A; 5 [min]
5%	⁶⁾ 5% ; 2A; 2,5 [min]	¹²⁾ 5% ; 2A; 5 [min]	¹⁸⁾ 5% ; 3A; 2,5 [min]	²⁴⁾ 5% ; 3A; 5 [min]	³⁰⁾ 5% ; 4A; 2,5 [min]	³⁶⁾ 5% ; 4A; 5 [min]

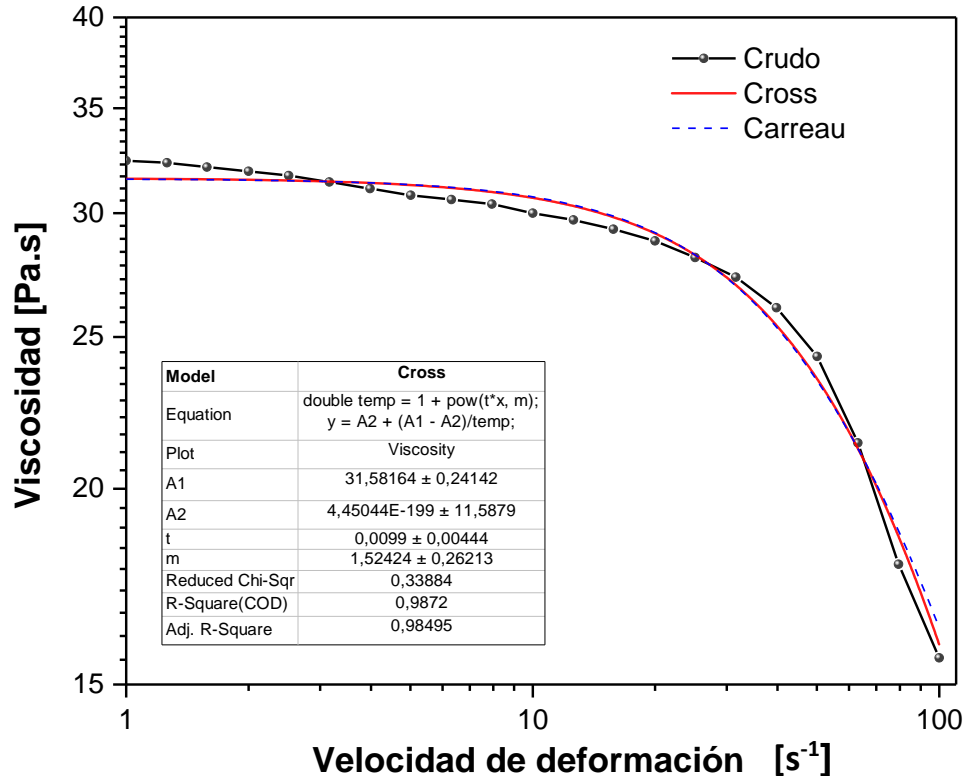
2.1.5.3 Ensayos oscilatorios: Se evaluó el efecto del campo magnético sobre las componentes viscoelásticas (G' y G'') de las muestras con nanopartículas y el patrón k-20%, con una rampa lineal de corriente de 0 a 4 A y una amplitud porcentual de 1% y frecuencia de 10 rad/s.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 MODELACIÓN REOLÓGICA

Para describir el comportamiento reológico de un fluido, generalmente se utilizan ecuaciones constitutivas para relacionar los esfuerzos con la deformación, la velocidad de deformación y/o el tiempo. Para identificar el modelo que mejor se ajuste al comportamiento del crudo, se compararon dos tipos: el modelo de Cross y el de Carreau. La Figura 3 muestra la viscosidad en función de la velocidad de deformación del crudo pesado, junto con el ajuste de los modelos reológicos evaluados. Los resultados muestran que el modelo de Cross y el de Carreau se ajustaron, como indica el coeficiente de determinación R-cuadrado. (Ver Anexo E, donde se encuentran los modelos y parámetro reológicos empleados). Básicamente se muestra una zona a bajas razones de deformación donde el fluido tiende a comportarse como Newtoniano y otra zona donde se muestra un fuerte comportamiento reofluidizante (“Shear thinning”).

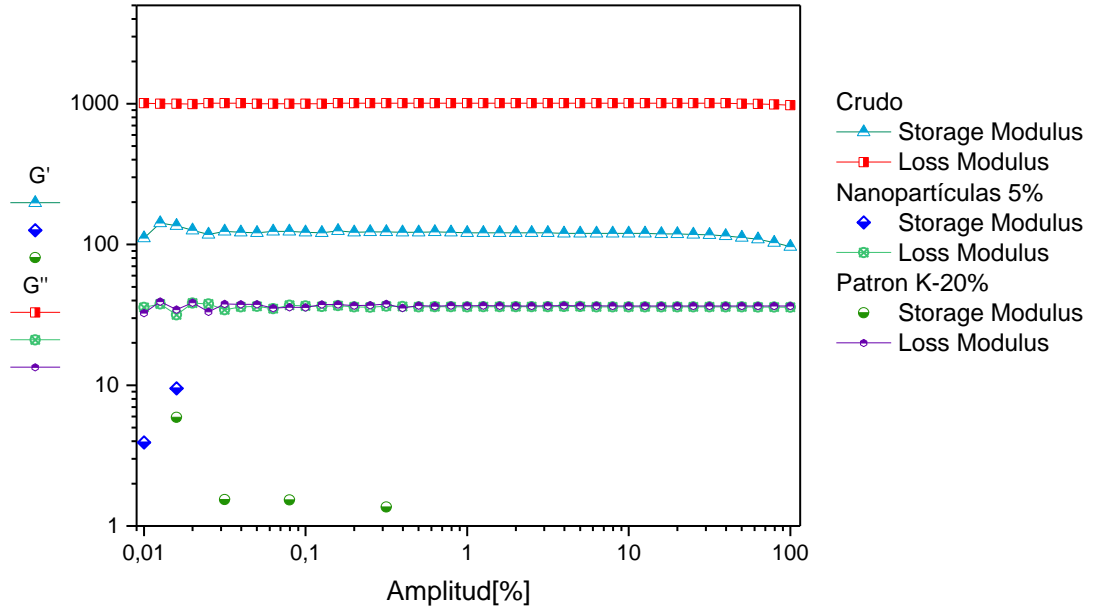
Figura 3. Comportamiento de la viscosidad en función de la velocidad de corte del crudo pesado.



3.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO

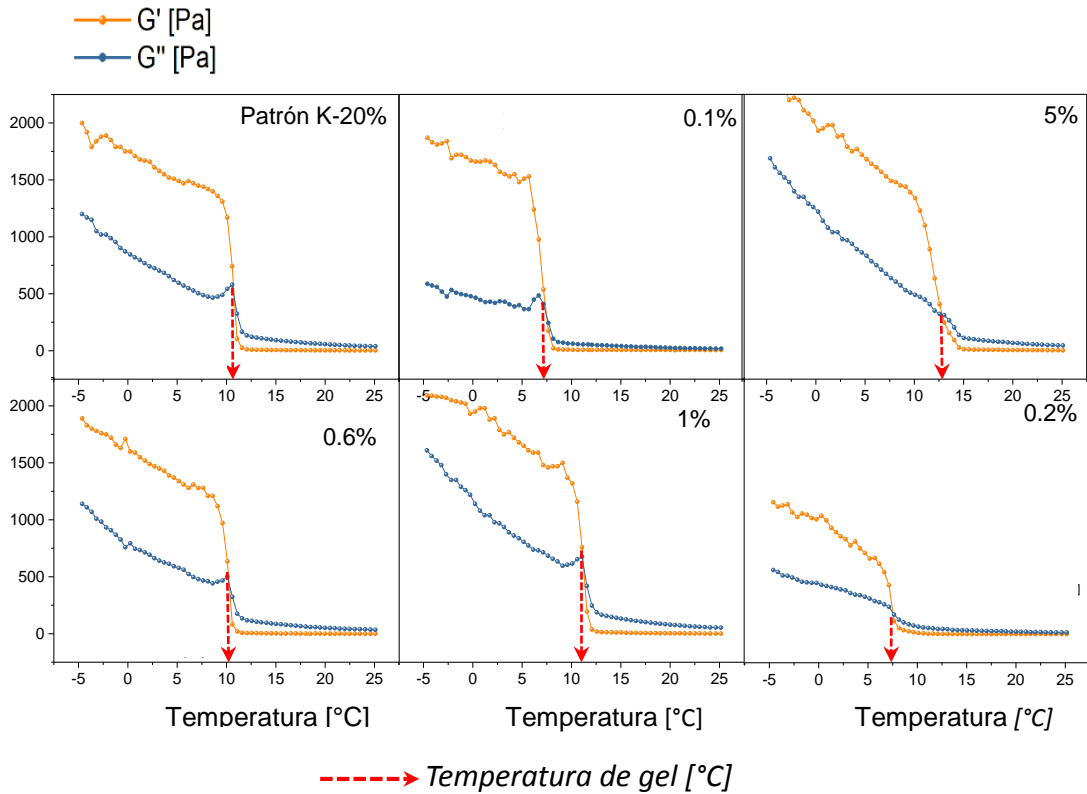
Con los ensayos oscilatorios se desea conocer si la incorporación de nanopartículas magnéticas, además de la adición de kerosene, daba lugar a alguna modificación en el comportamiento viscoelástico del crudo pesado. En este caso, se analizó el crudo diluido tratado con 5% p/p de nanopartículas magnéticas.

Figura 4. G' y G'' en función de la amplitud porcentual del crudo pesado, crudo diluido y crudo diluido tratado con 5% de nanopartículas a 25°C.



En la figura 4, se evidencia que el crudo pesado obedece a un comportamiento viscoelástico, puesto que tanto G' como G'' son diferentes de cero. Por otro lado, tanto en la mezcla crudo-kerosene (patrón) y crudo-ferrofluido(5%p/p) se observó que $G'=0$, lo que indica que el kerosene hace que el crudo pierda su carácter elástico y que su comportamiento se vuelva netamente viscoso. Por lo tanto, las nanopartículas no tienen afecto alguno para este ensayo particular. Conforme a los resultados anteriores, se evaluó la influencia de la temperatura sobre el comportamiento viscoelástico, para ello, se realizaron mediciones de G' y G'' en función de la temperatura.

Figura 5. G' y G'' en función de la temperatura del crudo pesado, crudo diluido y crudo diluido tratado con 5% de nanopartículas.



Según la Figura 5, a medida que disminuye la temperatura del ensayo (de 25 a 5°C) para la muestra patrón, se puede notar que la componente viscosa es quién domina el comportamiento, pero a su vez también existe una componente elástica dentro de ese mismo rango de temperatura, por esta razón se dice que el fluido presenta un comportamiento viscoelástico. Sin embargo, cuando se llega a una temperatura de 10.5 °C (punto de gel) hay un cambio drástico y la componente elástica sobrepasa a la viscosa, y en esta región ahora quien gobierna el carácter es la componente elástica. Este fenómeno ocurre debido a que, al reducirse la temperatura, se aumenta la interacción entre partículas sólidas (asfaltenos), formando aglomerados de mayor tamaño, quienes son los que le otorgan un carácter elástico al material. También, el cambio de temperatura permite que otros

componentes como resinas, parafinas o saturados, emigren a la fase sólida del crudo.

Por tanto, se infiere que la reducción de la temperatura favorece la interacción y precipitación de partículas sólidas en el medio. Con respecto a la inclusión de nanopartículas, éstas juegan un papel importante ya que, como lo muestra la figura 5, son responsables de cambiar el valor de la temperatura de gel. Como se observa, las muestras con 0.1 y 0.2% p/p retrasan el punto de gel, es decir, que es menor con respecto al del patrón, esto quiere decir que estas concentraciones de nanopartículas perjudican la interacción entre las partículas sólidas del crudo; por el contrario, la muestra más concentrada (5%) tienen un efecto opuesto, pues adelanta la temperatura de gel y favorece dicha interacción; mientras que las muestras con 1 y 0,6% p/p no tienen una influencia significativa en este aspecto. Las concentraciones que retrasan esta temperatura de gel son convenientes, ya que permiten aumentar el rango en el que la componente viscosa supera a la elástica, por lo tanto, no domina el carácter sólido o elástico facilitando su movilidad.

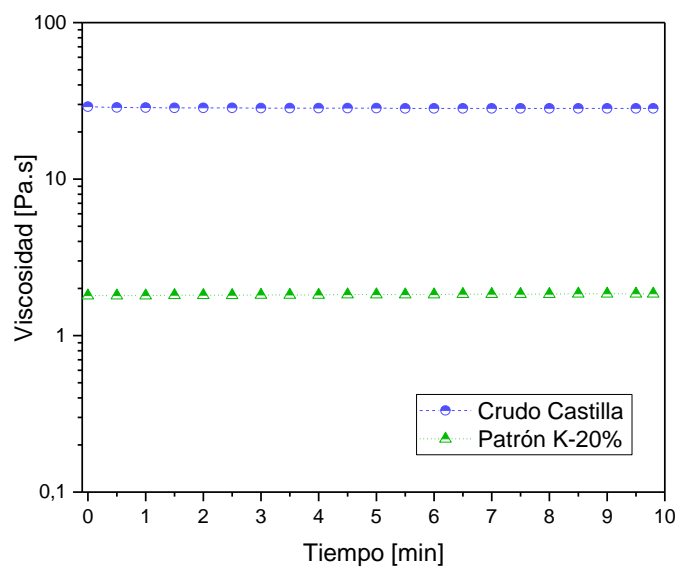
3.3 EFECTO DE INCLUSIÓN DE SOLVENTE (KEROSENE) EN CRUDO

Para la elección de kerosene como líquido portador de las nanopartículas (ferrofluido), se tuvo en cuenta que solventes no polares con constante dieléctrica menor a 5, han sido seleccionados para la síntesis de ferrofluidos en base aceite, pues evitan la agregación causada por fuerzas de Van der Waals [29].

La Figura 6 muestra que la dilución del crudo con kerosene redujo su viscosidad de 28.4 a 1.7 Pa·s (~94%), esto se debe a que el solvente rompe las asociaciones moleculares de asfaltenos con otros constituyentes y en efecto, diluye el medio y

produce una menor viscosidad. Este fenómeno fue descrito por Chanda *et al.*, [30] sobre crudos parafínicos hindúes con contenido de asfaltenos entre 2.4-3.5% y diluidos en benceno, xileno, piridina, nitrobenzeno (1-5%) en combinación con depresores de punto de fluidez (PPD, por sus siglas en inglés).

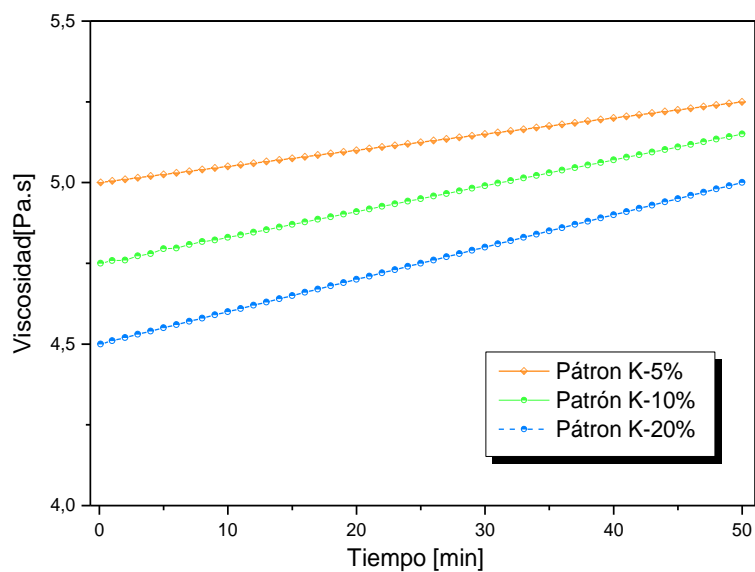
Figura 6. Comportamiento de la viscosidad en el tiempo (crudo y patrón k-20%).



Después de diluir el crudo con kerosene en una proporción de 20% p/p (patrón), sorprendentemente se observó que este genera un comportamiento reopéctico de esta mezcla, es decir, la viscosidad de la mezcla incrementa en el tiempo a una tasa de corte constante. Por otro parte, se observó que el efecto reopéctico es proporcional a la proporción de kerosene en el crudo como se muestra en la Figura 7. Este efecto es contrario a lo que normalmente se evidencia en crudos pesados sometidos a cizalla, los complejos asfaltenos-resinas tienden a romperse por efecto de la misma, produciendo menos resistencia al flujo y disminuyendo la viscosidad del fluido. No obstante, una revisión bibliográfica al respecto mostró

que Chanda *et al.*, [30] reportó un comportamiento similar en crudos parafínicos diluidos y con PPD. Chanda *et al.*, establecieron que estos solventes ocasionan un aumento en el volumen hidrodinámico (producto entre la viscosidad intrínseca y el peso molecular), debido a la estrecha interacción entre grupos polares presentes en las estructuras de estos complejos.

Figura 7. Comportamiento de viscosidad en el tiempo (patrones)



La figura 7 muestra los resultados luego de haber agregado el diluyente en proporciones de 5 y 10 %p/p, de la cual se podría inferir que el que el kerosene otorga el carácter reopéctico del fluido.

3.4 EFECTO DE LA INCLUSIÓN DE NANOPARTÍCULAS

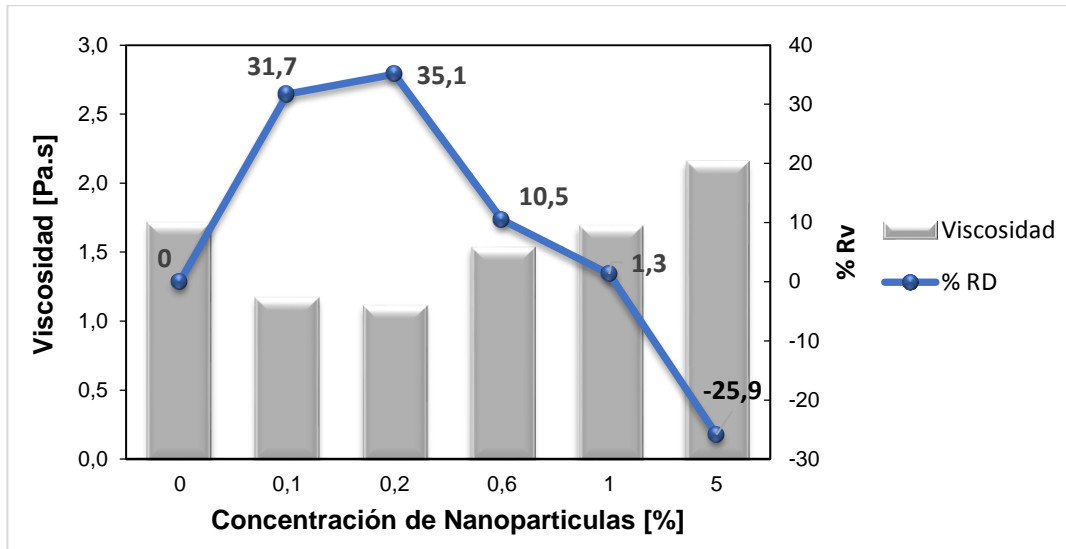
Para poder evidenciar de manera clara el efecto aislado de las nanopartículas sobre el comportamiento reológico del crudo, se usó una expresión que permite determinar el porcentaje de reducción de viscosidad tomando como base la mezcla crudo kerosene mediante la ecuación (8) [7]:

$$\%RV = \frac{(\mu_{patrón} - \mu_{\%nanop})}{(\mu_{patrón})} * 100 \quad (8)$$

Donde, $\mu_{patrón}$ y $\mu_{\%nanop}$ son las viscosidades de la muestra patrón (crudo-kerosene) y la viscosidad de las mezclas crudo-ferrofluido respectivamente.

En la figura 8, se muestra una gráfica que muestra el efecto de la concentración de nanopartículas de Fe_3O_4 en la viscosidad del crudo diluido y el porcentaje de reducción de viscosidad con respecto al patrón k-20% (concentración de 0% de nano-partículas).

Figura 8. Evaluación del efecto de nanopartículas en el crudo pesado y su comparación respecto al patrón



Los resultados muestran que la interacción del crudo-ferrofluido depende de la concentración final de nanopartículas en la mezcla. Como se observa en la figura 8, existe una concentración crítica de nanopartículas en el crudo que favorece la movilidad del crudo y para esta situación particular es 0.2%p/p: concentraciones inferiores a 1% disminuyen la viscosidad y concentraciones mayores a 1%p/p aumentan la viscosidad. Para explicar este comportamiento, se debe tener en cuenta que existen evidencias experimentales en crudos pesados y extra pesados que demuestran la tendencia de los asfaltenos a auto asociarse y formar agregados. Dependiendo del régimen de concentración y la naturaleza de los crudos, su estructuración puede ser de corto (clústeres) o largo (redes) alcance. Éste último, en particular, modifica el comportamiento reológico y favorece la aparición de visco elasticidad, tixotropía y reo fluidización [37-46].

El alto contenido de asfaltenos que se encuentran en los crudos pesados y extra pesados, permiten que exista mayor probabilidad de que haya interacción entre partículas de asfaltenos, la interacción lleva a los asfaltenos a asociarse y a formar

agregados que traen como consecuencia la generación de una red viscoelástica en la microestructura y al aumento de viscosidad en los crudos pesados.

En virtud de lo anterior, Aristizábal-Fontal *et al.* [7], demostraron mediante experimentos de adsorción discontinua y mediciones de dispersión de luz que las nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) adsorben los asfaltenos presentes en un crudo extra pesado. Ellos observaron que las nanopartículas tienen la capacidad de absorber $1.13 \text{ m}^2/\text{g}$ de asfaltenos, indicando que el número de moléculas individuales de asfaltenos en el medio es reducido y, por tanto, la interacción entre asfaltenos es limitada. Los resultados fueron corroborados por mediciones de dispersión dinámica de luz (DLS, Dynamics Light Scattering) que indicaron que el tamaño de los agregados de asfaltenos totales cambia de $1,017 \text{ nm}$ en ausencia de nanopartículas a 601 nm , después de la inclusión.

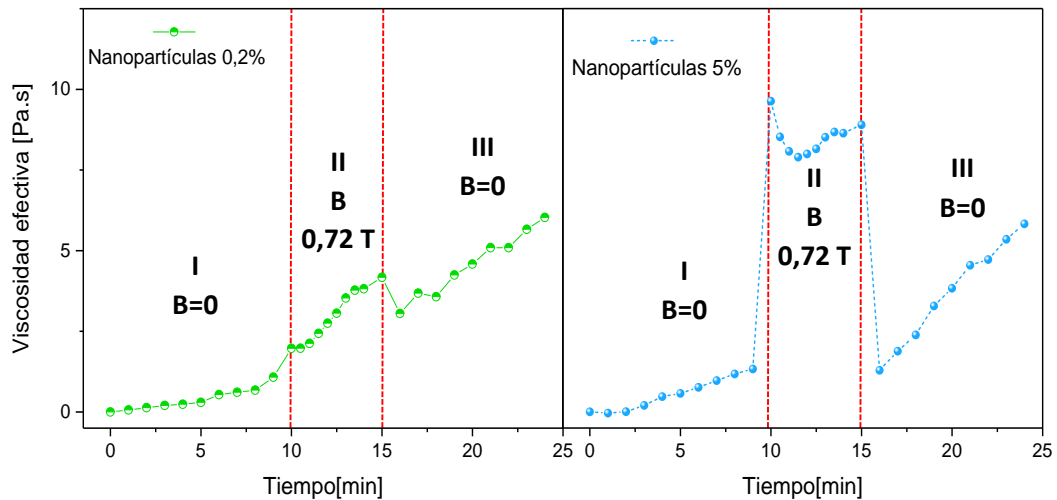
Por otro lado, concentraciones inferiores a $0.2\% \text{ p/p}$ pueden resultar insuficientes para adsorber la cantidad necesaria de asfaltenos y disminuir la viscosidad. Además, el porcentaje de la muestra con $5\% \text{ p/p}$ aumenta la viscosidad y seguramente las interacciones nanopartícula-nanopartícula son potencializadas, dando lugar a reducciones del área superficial y, en consecuencia, menos capacidad de adsorción de asfaltenos.

3.5 EVALUACIÓN MAGNETOREOLÓGICA

3.5.1 Comportamiento inducido por el campo magnético. Para determinar la influencia del campo magnético sobre el comportamiento reológico de las muestras con nanopartículas, se construyeron curvas de viscosidad contra tiempo divididas en tres regiones, como se describió en la metodología.

La Figura 9 muestra las curvas de viscosidad contra tiempo. En este caso el pulso de campo magnético de 0.72 T se inicia a los 10 minutos y se sostiene por 5 minutos. En la región II (con campo magnético) se observa un aumento de viscosidad, debido a que el carácter superparamagnético de las nanopartículas da lugar a la formación de estructuras lineales en el fluido [32]. Por otra parte, en la región III (ausencia de campo) o de recuperación, se observa una reducción de viscosidad, ya que no existe interacción entre nanopartículas y la cizalla rompe los aglomerados formados por la exposición al campo. Sin embargo, la viscosidad en esta región es superior a la inicial, lo que indica que parte de estas agrupaciones de partículas no han desaparecido por efecto de la velocidad de corte. Chand *et al.* [31] observaron resultados semejantes en mezclas de ferrofluidos y fluidos magneto reológicos (F-MRFs) y afirman que las nanopartículas tienen la capacidad de retener la magnetización por un tiempo determinado, después de estar sometidas a campo magnético. Por otra parte, las muestras que presentan mayor interacción con el campo magnético son las más concentradas, como ilustra la Figura 9. Es importante mencionar que este incremento en la viscosidad se evidenció en todas las muestras (ver Anexo F).

Figura 9. Comportamiento de la viscosidad en función del tiempo por efecto de un campo magnético de 0,72 T en muestras con nanopartículas de 0,2 y 5% p/p.

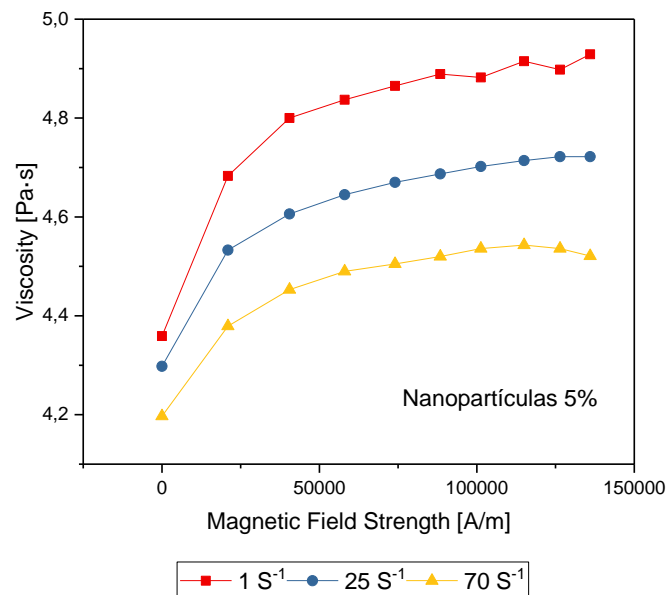


Pese al control de temperatura localizado con el sensor PT-100, se encontró que un pulso de 0,72 T (4 A) y 5 minutos modifica la viscosidad de la muestra patrón hasta 3%. Por lo que la región ii y iii de las curvas de estado transitorio fueron ajustadas a una viscosidad efectiva $\mu_{Efectiva}$, (ver anexo G).

3.5.2 Efecto magneto-viscoso y de cizalla. La figura 10, muestra que para la muestra con nanopartículas con concentración mayor (5% p/p), la viscosidad se incrementa conforme aumenta la intensidad del campo magnético, esto es debido a que la interacción dipolo-dipolo entre partículas magnéticas se fortalece, permitiendo la formación de cadenas microestructurales, las cuáles se organizan en dirección al campo inducido.

Chand *et al.*, realizaron estudios y descubrieron, mediante imágenes de reomicroscopía de ferrofluidos con altas concentraciones y expuestos a campos magnéticos, la formación de aglomerados o cadenas que impiden el movimiento libre de partículas y por lo tanto, esto da lugar a un aumento en la viscosidad del fluido [31].

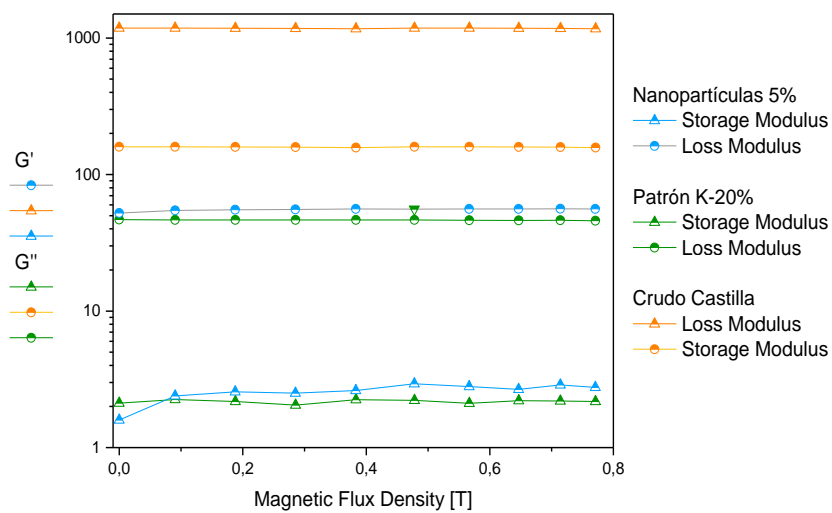
Figura 10. Curva de muestra con nanopartículas al 5% p/p de viscosidad en función del campo magnético sometida a 1, 25 y 70 s⁻¹.



En la figura 10, se puede apreciar que, el aumento de viscosidad por efecto del campo inducido, disminuye a medida que la velocidad de corte aumenta, pues las cadenas de aglomerados que se forman por efecto del campo se rompen bajo la influencia de la cizalla. En conclusión, el aumento en la viscosidad se debe al agrupamiento entre partículas causado por la exposición al campo, mientras que la disminución de la viscosidad es generada por la ruptura de dichas agrupaciones como consecuencia del aumento en la velocidad de corte [32].

3.5.3 Análisis del comportamiento viscoelástico. De la Figura 11 se puede evidenciar que el campo magnético tiene una fuerte influencia en las propiedades viscoelásticas tanto de la muestra patrón como de la muestra con nanopartículas ya que, a diferencia de la evaluación del comportamiento viscoelástico en ausencia de campo, el modulo elástico es diferente de cero.

Figura 11. Curva de módulos de pérdida y almacenamiento en función del campo magnético (patrón k-20%, crudo y nanopartículas 5% p/p)



4. CONCLUSIONES

- El protocolo de inclusión de nanopartículas fue exitoso, teniendo en cuenta que se logró la estabilización de éstas en el crudo diluido con kerosene al 20%p/p durante el periodo de experimentación. Esto pudo comprobarse al evidenciar un efecto magneto reológico en las muestras y la ausencia de precipitación de micro agregados.
- La inclusión de nanopartículas al crudo dio lugar a una reducción de viscosidad a bajas concentraciones de estas hasta del 35%. . La concentración de 0,2% p/p fue la que obtuvo un mayor porcentaje de reducción. Sin embargo, la concentración de 5 % p/p registró un aumento en la viscosidad. El proceso de inclusión de nanopartículas no solo influyó en la viscosidad del crudo, también tuvo un efecto en el comportamiento viscoelástico, desplazando la temperatura de gel.
- Se observó que la mezcla ferrofluido-crudo (o crudo con nanopartículas) presenta un comportamiento reológico similar al de un ferrofluido bajo un campo magnético estático. Este resultado sugiere que otros comportamientos reológicas observados en ferrofluidos bajo otros tipos de campo magnético podrían ser potencialmente útiles en el transporte de crudo pesados.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar el comportamiento magneto-reológico en un sistema de flujo, teniendo en cuenta las dificultades de la generación de campos con densidades de flujo magnético del orden de 1 T, así como las pérdidas magnéticas en regiones macroscópicas (oleoductos).
- Emplear campos magnéticos rotacionales y alternantes para evidenciar posibles efectos magneto-viscosos negativos, como se ha comprobado en estudios previos con ferrofluidos [32].
- Diseñar un sistema de recuperación de nanopartículas magnéticas, con el fin de disminuir costos en aplicaciones a escala industrial.
- Incorporar un sistema de control de temperatura de la celda magneto-reológica con una chaqueta de refrigeración externa para mitigar el problema de sobrecalentamiento, debido a que el sistema actual no logró ser del todo eficiente. De acuerdo con las recomendaciones de Odenbach, se debe asegurar que la temperatura se mantenga con una precisión superior a 0.1 K en toda la muestra [32].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PETROGUIA. Campetrol: 55% del petróleo que se produce en Colombia es crudo pesado. [En Línea] Revista Virtual Petroguía, 2015. p. 1. Retrieved from <http://www.petroguia.com/pub/article/campetrol-55-del-petr%C3%B3leo-que-se-produce-en-colombia-es-crudo-pesado>
- [2] HART, Abarasi. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines, en J Petrol Explor Prod Technol. 2014 4: 327–336. <https://doi.org/10.1007/s13202-013-0086-6>.
- [3] MARTÍNEZ-PALOU, Rafael. et al Jorge. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. En Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011. 75(3–4), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>
- [4] RANA, Mohan. SÁMANO, Vicente and. DIAZ, J. A. I. A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residua,” en: Fuel, 2007.vol. 86, no. 9, pp. 1216–1231
- [5] CONSIGLIA, María., CAROTENUTO, Claudia., GARGIULO, Valentina., STANZIONE, Fernando., CIAJOLO, Anna., & MINALE, Mario. Chemical – physical analysis of rheologically different samples of a heavy crude oil. Fuel Processing Technology, 2016.Vol.148, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.00>.
- [6] ROCHA. Nelson, GONZÁLEZ Caspar, MARQUES Luis Carlos, AND. VAITSMAN Delmo Santiago, “A preliminary study on the magnetic treatment of fluids,” Petroleum Science and Technology., vol. 18, no. 1–2, pp. 33–50, 2000. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460008949830>

[7] CORTÉS, F. B., ARISTIZÁBAL-FONTAL, J. E., & FRANCO, C. A. . Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite ferrofluids. *Adsorption Science And Technology*, 2017. 100(1). <https://doi.org/10.1177/026361741770430>

[8] TABORDA Esteban, FRANCO Camilo, LOPERA Sergio, ALVARADO Vladimir, AND CORTES Farid, "Rheological demonstration of alteration in the heavy crude oil fluid structure upon addition of nanoparticles," *Fuel*, 2017 vol. 189, pp. 322–333.

[9] NASSAR Nashaat et al, "Development of a Population Balance Model to Describe the Influence of Shear and Nanoparticles on the Aggregation and Fragmentation of Asphaltene Aggregates," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015. vol. 54, no. 33, pp. 8201–8211.

[10] KOTHARI, Nikita., RAINA, Bhavna., CHANDAK, Krishna., IYER, Venkat., & MAHAJAN, Hrishikesh. Application of Ferrofluid for Enhanced Surfactant Flooding in EOR, 2010. Annual Conference and Exhibition held in Barcelona, Spain, 1–7.

[11] MARQUES, L. ROCHA. O, MACHADO,A.L. NEVES, GBM. VIEIRA,LC. AND DITZ,CH. "Study of paraffin crystallization process under the influence of magnetic fields and chemicals," in *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, 1997.

[12] CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) Ferrofluidos acuosos para hipertermia con valores de calentamiento mejorados, 2017. disponible en: http://www.ictp.csic.es/OfertaTecnologica/Folleto%20PT_025_201631442_Hernandez_2017-02-16.pdf.

[13] TAO, R. TAO, XU X, "Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field," *Energy & Fuels*, 2006. vol. 20, no. 5, pp. 2046–2051.

- [14] LOSKUTOVA, Y. V, YUDINA, N. V, & PISAREVA, S. I. Effect of magnetic field on the paramagnetic, antioxidant, and viscosity characteristics of some crude oils. *Petroleum Chemistry*, 2008. Vol. 48(1), 51–55. <https://doi.org/10.1134/S0965544108010106>
- [15] GONÇALVES José, et al “Study of the factors responsible for the rheology change of a Brazilian crude oil under magnetic fields,” *Energy & Fuels*, 2011. vol. 25, no. 8, pp. 3537–3543.
- [16] HOMAYUNI, F. HAMIDI, A. VATANI, A. SHAYGANI, A AND FARAJI DANA, R “The viscosity reduction of heavy and extra heavy crude oils by a pulsed magnetic field,” *Pet. Sci. Technol.*, 2011. vol. 29, no. 23, pp. 2407–2415.
- [17] ROSENSWEIG, R.E "Ferrohydrodynamics", Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- [18] HARVARD. Devold. *Oil and Gas Production Handbook: An Introduction to Oil and Gas Production and introduction to oil and gas production handbook 2013*. 3ra Edición.
p.4https://library.e.abb.com/public/34d5b70e18f7d6c8c1257be500438ac3/Oil%20and%20gas%20production%20handbook%20ed3x0_web.pdf
- [19] ROJAS, O. *Introducción a la reología*. 1999. Mérida
- [20] MAESTRO, Alicia, *Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo*. Tesis Doctoral. Barcelona.: Universidad de Barcelona, Facultad de química, 2002.
- [21] ROJAS, Orlando. BRICEÑO, Isabel. and AVENDAÑO, Jorge. *Fundamentos de reología*. Mérida, 2012.

[22] ANGELES HERNÁNDEZ José de Jesús, Caracterización mecánica del comportamiento viscoelástico de muestras de hueso trabecular bovino. [Tesis] Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

[23] DOMÍNGUEZ TORIBIO Juan Carlos, Comportamiento viscoelástico de resinas resol y ligno-resol. Químico-Reología de la cinética del curado de una resina resol., 2009.

[24] OGOLO, N. A., OLAFUYI, O. A., ONYEKONWU, M. O., Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles Technology, P., & Fund, D. 2012.

[25] SHARMA, Shivanjali; MAHTO, Vikas; y SHARMA, Virender. «Effect of flow improvers on rheological and microscopic properties of Indian waxy crude oil», Ind. Eng. Chem. Res., 2014, vol. 53, n.o 12, pp. 4525-4533.

[26] GARCÍA, César Augusto et al. Optimización del transporte por oleoducto de crudo pesado castilla. Revista Fuentes, [S.l.], v. 8, n. 1, nov. 2010. ISSN 2145-8502.

Disponible en:
<<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/1148>>.

[27] LÓPEZ-LÓPEZ, M. T., DE VICENTE, J., BOSSIS, G., GONZÁLEZ-CABALLERO, F., & DURÁN, J. D. G. Preparation of stable magnetorheological fluids based on extremely bimodal iron–magnetite suspensions. Journal of materials research, (2005). 20(4), 874-881.

[28] PÉREZ, M. Deshidratación y desalado de crudos pesados y extrapesados en instalaciones costa fuera. 2017.

- [29] LÓPEZ-LÓPEZ, M. T., DURÁN, J. D. G., DELGADO, A. V., & GONZÁLEZ-CABALLERO, F. Stability and magnetic characterization of oleate-covered magnetite ferrofluids in different nonpolar carriers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005. Vol. 291(1), 144-151
- [30] CHANDA, D., SARMAH, A., BORTHAKUR, A., RAO, K. V., SUBRAHMANYAM, B., & DAS, H. C. Combined effect of asphaltenes and flow improvers on the rheological behaviour of Indian waxy crude oil. *Fuel*, 1998. Vol 77(11), 1163-1167.
- [31] CHAND, M., SHANKAR, A., JAIN, K., & PANT, R. P. Improved properties of bidispersed magnetorheological fluids. *RSC Advances*, 2014. Vol. 4(96), 53960-53966.
- [32] ODENBACH, S., & THURM, S. Magnetoviscous effects in ferrofluids. *Lecture notes in physics-New York then Berlin-*, 2002. P. 185-201.
- [33] SCHERER, C., & NETO, A. M. F. *Ferrofluids: Properties and Applications*, (2005). Vol. 35(3), 718–727.
- [34] SENGUPTA, S., & OFFSHORE, H. *An Innovative Approach to Image Fracture Dimensions by Injecting Ferrofluids*. 2012.
- [35] OLEODUCTO CENTRAL S.A. - OCENSA, “Boletín de Transporte por Oleoducto - B.T.O,” *Capacidad Efectiva*, 2016.
- [36] EBERL, E. AND EBERL, U. “Parameters of transport of non-Newtonian fluids through the pipes,” *Rud. Zb.*1995. vol. 7, pp. 65–69.

[37] LESUEUR, D. "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 145, no. 1–2, pp. 42–82, Jan. 2009.

[38] MORTAZAVI-MANESH, S. & SHAW, J. "Thixotropic Rheological Behavior of Maya Crude Oil," *Energy & Fuels*, vol. 28, no. 2, pp. 972–979, Feb. 2014.

[39] SOTO-CASTRUITA, E., RAMÍREZ-GONZÁLEZ, P., MARTÍNEZ-CORTÉS, U. and QUIÑONES-CISNEROS, S. "Effect of the Temperature on the Non-Newtonian Behavior of Heavy Oils," *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 5, pp. 2883–2889, May 2015.

[40] ABIVIN, P., TAYLOR, S. and FREED, D. "Thermal Behavior and Viscoelasticity of Heavy Oils," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 6, pp. 3448–3461, Jun. 2012.

[41] DION, M. and U. of A. D. of C. and M. Engineering, *Modelling the Rheology of Complex Fluids: Cases of Bitumen and Heavy Oils at Low Temperatures*. University of Alberta, 2011.

[42] BEHZADFAR, E. and HATZIKIRIAKOS, S. "Viscoelastic properties and constitutive modelling of bitumen," *Fuel*, vol. 108, pp. 391–399, Jun. 2013.

[43] MOUAZEN, M., POULESQUEN, A. and VERGNES, B. "Correlation between thermal and rheological studies to characterize the behavior of bitumen," *Rheol. Acta*, vol. 50, no. 2, pp. 169–178, Feb. 2011.

[44] YUSOFF, N., SHAW, M. and AIREY, G. "Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2171–2189, 2011.

[45] ILYIN, S., ARININA, M., POLYAKOVA, M., BONDARENKO, G., KONSTANTINOV, L., KULICHIKHIN, V. and MALKIN, A. "Asphaltenes in heavy crude oil: Designation, precipitation, solutions, and effects on viscosity," J. Pet. Sci. Eng., vol. 147, pp. 211–217, 2016.

[46] PIERRE, C., BARRÉ, L., PINA, A. & MOAN, M. "Composition and heavy oil rheology," Oil Gas Sci.

BIBLIOGRAFIA

ABIVIN, P., TAYLOR, S. and FREED, D. "Thermal Behavior and Viscoelasticity of Heavy Oils," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 6, pp. 3448–3461, Jun. 2012.

ANGELES HERNÁNDEZ José de Jesús, *Caracterización mecánica del comportamiento viscoelástico de muestras de hueso trabecular bovino*. [Tesis] Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

BEHZADFAR, E. and HATZIKIRIAKOS, S. "Viscoelastic properties and constitutive modelling of bitumen," *Fuel*, vol. 108, pp. 391–399, Jun. 2013.

CHAND, M., SHANKAR, A., JAIN, K., & PANT, R. P. Improved properties of bidispersed magnetorheological fluids. *RSC Advances*, 2014. Vol 4(96), 53960-53966.

CHANDA, D., SARMAH, A., BORTHAKUR, A., RAO, K. V., SUBRAHMANYAM, B., & DAS, H. C. Combined effect of asphaltenes and flow improvers on the rheological behaviour of Indian waxy crude oil. *Fuel*, 1998. Vol 77(11), 1163-1167.

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) *Ferrofluidos acuosos para hipertermia con valores de calentamiento mejorados*, 2017. disponible en: http://www.ictp.csic.es/OfertaTecnologica/Folleto%20PT_025_201631442_Hernandez_2017-02-16.pdf.

CONSIGLIA, María., CAROTENUTO, Claudia., GARGIULO, Valentina., STANZIONE, Fernando., CIAJOLO, Anna., & MINALE, Mario. *Chemical – physical*

analysis of rheologically different samples of a heavy crude oil. *Fuel Processing Technology*, 2016. Vol.148, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.00>.

CORTÉS, F. B., ARISTIZÁBAL-FONTAL, J. E., & FRANCO, C. A. . Viscosity reduction of extra heavy crude oil by magnetite ferrofluids. *Adsorption Science And Technology*, 2017. 100(1). <https://doi.org/10.1177/026361741770430>

DION, M. and U. of A. D. of C. and M. Engineering, *Modelling the Rheology of Complex Fluids: Cases of Bitumen and Heavy Oils at Low Temperatures*. University of Alberta, 2011.

DOMÍNGUEZ TORIBIO Juan Carlos, *Comportamiento viscoelástico de resinas resol y ligno-resol. Químico-Reología de la cinética del curado de una resina resol.*, 2009.

EBERL, E. AND EBERL, U. “Parameters of transport of non-Newtonian fluids through the pipes,” *Rud. Zb.*1995. vol. 7, pp. 65–69.

GARCÍA, César Augusto et al. Optimización del transporte por oleoducto de crudo pesado castilla. *Revista Fuentes*, [S.I.], v. 8, n. 1, nov. 2010. ISSN 2145-8502. Disponible en: <<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/1148>>.

GONÇALVES José,. BOMBARD antonio, SOARES Demetrio. CARVALHO, Ricardo. NASCIMENTO, Andrea. SILVA, Manoel. ALCÂNTARA, Silvia. PELEGRINI, Fernando. VIEIRA, Ernanni and PIROTA, Kleber “Study of the factors responsible for the rheology change of a Brazilian crude oil under magnetic fields,” *Energy & Fuels*, 2011. vol. 25, no. 8, pp. 3537–3543.

HART, Abarasi. A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines, *J Petrol Explor Prod Technol.* 2014 4: 327–336. <https://doi.org/10.1007/s13202-013-0086-6>.

HARVARD. Devold. Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production and introduction to oil and gas production handbook 2013.p.4 https://library.e.abb.com/public/34d5b70e18f7d6c8c1257be500438ac3/oil%20and%20gas%20production%20handbook%20ed3x0_web.pdf

HOMAYUNI, F. HAMIDI, A. VATANI, A. SHAYGANI, A AND FARAJI DANA, R “The viscosity reduction of heavy and extra heavy crude oils by a pulsed magnetic field,” *Pet. Sci. Technol.*, 2011. vol. 29, no. 23, pp. 2407–2415.

ILYIN, S., ARININA, M., POLYAKOVA, M., BONDARENKO, G., KONSTANTINOV, L., KULICHIKHIN, V. and MALKIN, A. “Asphaltenes in heavy crude oil: Designation, precipitation, solutions, and effects on viscosity,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 147, pp. 211–217, 2016.

KOTHARI, Nikita., RAINA, Bhavna., CHANDAK, Krishna., IYER, Venkat., & MAHAJAN, Hrishikesh. Application of Ferrofluid for Enhanced Surfactant Flooding in EOR, 2010. Annual Conference and Exhibition held in Barcelona, Spain, 1–7.

LESUEUR, D. “The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 145, no. 1–2, pp. 42–82, Jan. 2009.

LÓPEZ-LÓPEZ, M. T., DE VICENTE, J., BOSSIS, G., GONZÁLEZ-CABALLERO, F., & DURÁN, J. D. G. Preparation of stable magnetorheological fluids based on extremely bimodal iron–magnetite suspensions. *Journal of materials research*, (2005). 20(4), 874-881.

LÓPEZ-LÓPEZ, M. T., DURÁN, J. D. G., DELGADO, A. V., & GONZÁLEZ-CABALLERO, F. Stability and magnetic characterization of oleate-covered magnetite ferrofluids in different nonpolar carriers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005. Vol. 291(1), 144-151.

LOSKUTOVA, Y. V, YUDINA, N. V, & PISAREVA, S. I. Effect of magnetic field on the paramagnetic, antioxidant, and viscosity characteristics of some crude oils. *Petroleum Chemistry*, 2008. Vol 48(1), 51–55. <https://doi.org/10.1134/S0965544108010106>

MAESTRO, Alicia, *Reología de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelización y mecanismo de espesamiento asociativo*. Tesis Doctoral. Barcelona.: Universidad de Barcelona, Facultad de química, 2002.

MARQUES, L. ROCHA. O, MACHADO,A.L. NEVES, GBM. VIEIRA,LC. AND DITZ,CH. “Study of paraffin crystallization process under the influence of magnetic fields and chemicals,” in *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, 1997.

MARTÍNEZ-PALOU, Rafael. MOSQUEIRA, María. De. Lourdes., ZAPATA-RENDÓN, Beatriz., MAR-JUÁREZ, Elizabeth., BERNAL-HUICOCHEA, C., CLAVEL-LÓPEZ, J. DE LA CRUZ, & ABURTO, Jorge. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline : A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (2011). 75(3–4), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.020>.

MORTAZAVI-MANESH, S. & SHAW, J. “Thixotropic Rheological Behavior of Maya Crude Oil,” *Energy & Fuels*, vol. 28, no. 2, pp. 972–979, Feb. 2014.

MOUAZEN, M., POULESQUEN, A. and VERGNES, B. "Correlation between thermal and rheological studies to characterize the behavior of bitumen," Rheol. Acta, vol. 50, no. 2, pp. 169–178, Feb. 2011.

NASSAR Nashaat, BETANCUR Stefania, ACEVEDO Sócrates, FRANCO Camilo, AND CORTÉS Farib, "Development of a Population Balance Model to Describe the Influence of Shear and Nanoparticles on the Aggregation and Fragmentation of Asphaltene Aggregates," Ind. Eng. Chem. Res., 2015. vol. 54, no. 33, pp. 8201–8211.

ODENBACH, S., & THURM, S. Magnetoviscous effects in ferrofluids. Lecture notes in physics-New York then Berlin-, 2002. P. 185-201.

OGOLO, N. A., OLAFUYI, O. A., ONYEKONWU, M. O., Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles Technology, P., & Fund, D. 2012.

OLEODUCTO CENTRAL S.A. - OCENSA, "Boletín de Transporte por Oleoducto - B.T.O," Capacidad Efectiva, 2016.

PÉREZ, M. Deshidratación y desalado de crudos pesados y extrapesados en instalaciones costa fuera. (2017).

PETROGUIA. Campetrol: 55% del petróleo que se produce en Colombia es crudo pesado. [en Linea] Revista Virtual Petroguía, 2015. p. 1. Retrieved from <http://www.petroguia.com/pub/article/campetrol-55-del-petr%C3%B3leo-que-se-produce-en-colombia-es-crudo-pesado>

PIERRE, C., BARRÉ, L., PINA, A. & MOAN, M. "Composition and heavy oil rheology," Oil Gas Sci. Technol., vol. 59, no. 5, pp. 489–501, 2004.

RANA, Mohan. SÁMANO, Vicente and. DIAZ, J. A. I. A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residua,” en: Fuel, 2007.vol. 86, no. 9, pp. 1216–1231.

ROCHA. Nelson, GONZÁLEZ Caspar, MARQUES Luis Carlos, AND. VAITSMAN Delmo Santiago, “A preliminary study on the magnetic treatment of fluids,” Petroleum Science and Technology., vol. 18, no. 1–2, pp. 33–50, 2000. <http://dx.doi.org/10.1080/10916460008949830>

ROJAS, O. Introducción a la reología. 1999. Mérida.

ROJAS, Orlando. BRICEÑO, Isabel. and AVENDAÑO, Jorge. Fundamentos de reología. Merida, 2012.

ROSENSWEIG, R.E "Ferrohydrodynamics", Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

SCHERER, C., & NETO, A. M. F. Ferrofluids : Properties and Applications, (2005). Vol. 35(3), 718–727.

SENGUPTA, S., & OFFSHORE, H. An Innovative Approach to Image Fracture Dimensions by Injecting Ferrofluids. 2012.

SHARMA, Shivanjali; MAHTO, Vikas; y SHARMA, Virender. «Effect of flow improvers on rheological and microscopic properties of Indian waxy crude oil», Ind. Eng. Chem. Res., 2014, vol. 53, n.o 12, pp. 4525-4533.

SOTO-CASTRUITA, E., RAMÍREZ-GONZÁLEZ, P., MARTÍNEZ-CORTÉS, U. and QUIÑONES-CISNEROS, S. “Effect of the Temperature on the Non-Newtonian Behavior of Heavy Oils,” Energy & Fuels, vol. 29, no. 5, pp. 2883–2889, May 2015.

TABORDA Esteban, FRANCO Camilo, LOPERA Sergio, ALVARADO Vladimir, AND CORTES Farid, "Rheological demonstration of alteration in the heavy crude oil fluid structure upon addition of nanoparticles," *Fuel*, 2017 vol. 189, pp. 322–333.

TAO, R. TAO, XU X, "Reducing the Viscosity of Crude Oil by Pulsed Electric or Magnetic Field," *Energy & Fuels*, 2006. vol. 20, no. 5, pp. 2046–2051.

YUSOFF, N., SHAW, M. and AIREY, G. "Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2171–2189, 2011.

ANEXOS

ANEXO A. Aplicaciones de los ferrofluidos

Por sus capacidades los ferrofluidos han sido de gran provecho en innovaciones tecnológicas como por ejemplo su intervención en sistemas de disipación de calor, amortiguación de vibraciones no deseadas para motores y dopaje en nuevos materiales [10]. Por otro lado, en el campo de la biomedicina los ferrofluidos ofrecen una interesante aplicabilidad en producción de fármacos para tratamientos de quimioterapia, los cuales logran maximizar el efecto del fármaco en el tumor y minimizar los efectos secundarios, además hacen que se disminuya la cantidad necesaria en los tratamientos usados anteriormente; Debido a que los ferrofluidos tienen una gran capacidad absorción también son aptos para tratamientos de hipertermia, su aplicación permite mejorar la eficiencia del proceso elevando la temperatura por encima de 42 °C en tiempos muy cortos. También se ha investigado que tienen potencial para mejorar el contraste de imágenes de resonancia magnética y se usan en procedimientos de separación celular [10][33]. En la industria petrolera, se ha implementado en los métodos de medición en dimensiones de fracturas del subsuelo [34].

ANEXO B. Condiciones de operación típicas del transporte por oleoducto de crudos pesados colombianos

Colombia posee reservas concentradas de crudos pesados y extrapesados en las estructuras de la cuenca de los Llanos Orientales, el Magdalena medio y Putumayo (en los campos de Rubiales, Apiay, Ombú, Castilla, San Fernando, Teca, Nare y Jazmín). Para la evacuación de los crudos del área de los Llanos, Ecopetrol y asociados cuentan con los siguientes oleoductos [25]:

- Oleoducto Castilla – Apiay, que se extiende por 43.6 km entre la estación de Transferencia de Castilla (ETC) y la estación de Apiay.
- Oleoductos Apiay, Araguaey y Santiago-El Porvenir, que cuentan con una longitud aproximada de 125.5 km, 104 km y 79 km, respectivamente.
- Oleoducto Central de los Llanos (Ocensa), el cual posee una longitud aproximada de 830 km y se extiende a lo largo del país, desde el Piedemonte llanero (áreas de Cusiana y Cupiagua) hasta el Terminal Marítimo de Coveñas. Está organizado por segmentos:
 - Segmento 0: Entre Estación Cupiagua y Estación Cusiana.
 - Segmento I: Entre Estación Cusiana y Estación El Porvenir.
 - Segmento II: Inicia en la Estación El Porvenir, pasando por las Estaciones Miraflores y La Belleza, hasta la Estación Vasconia.
 - Segmento III: Inicia en la Estación Vasconia, pasa por la Estación Caucasia y finaliza en el Terminal Coveñas.

En la Tabla 3 se resume la capacidad efectiva promedio en miles de barriles de petróleo día (KBPD) estimada para el 2016 de cada uno de los segmentos y calculada con una viscosidad de 300 cSt a 30°C para crudos pesados[32] .

Tabla 3. Capacidad efectiva promedio

	KBPD	Pulg.
	Capacidad Efectiva	Diámetro
Segmento 0	198	16
Segmento I	687	30
Segmento II	687	36*-30
Segmento III	489	30

Fuente: OCENSA

En cuanto a la razón de deformación y su correlación con el flujo volumétrico del crudo en el oleoducto va a utilizarse una aproximación con la ecuación de Hagen Poiseuille para un fluido Newtoniano, como se indica a continuación [35][36]:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi r^3}$$

Donde Q, es el flujo volumétrico y r el radio de la tubería.

Tabla 4. Zona de razón de deformación aproximada en el transporte de crudos pesados por el Oleoducto OCENSA.

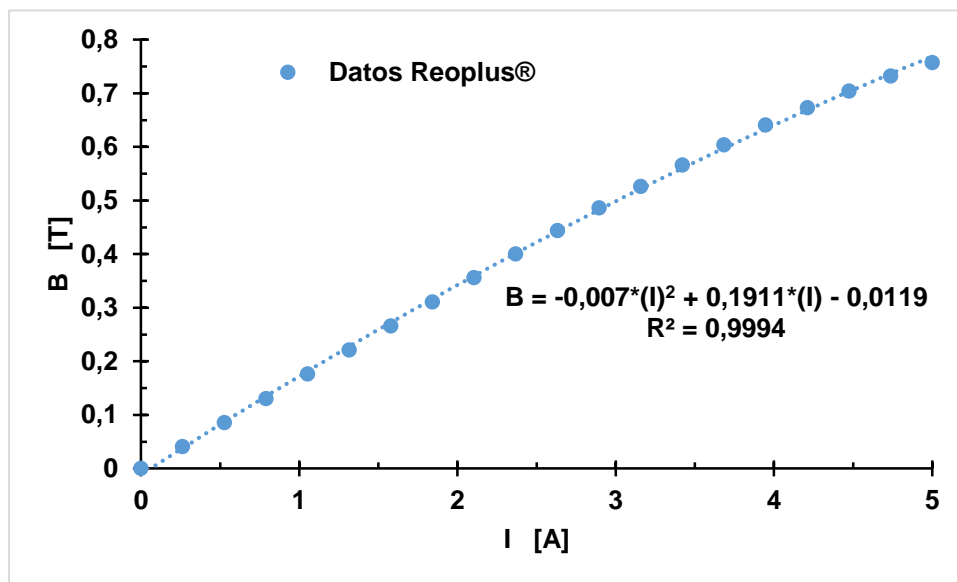
	Capacidad Efectiva (m ³ /s)	Diámetro (m)		$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	
Segmento 0	0,36	0,4064		55,29	
Segmento I	1,26	0,762		29,10	
Segmento II	1,26	0,9144	0,762	16,84	21,05
Segmento III	0,90	0,762		20,72	

Fuente: OCENSA

ANEXO C. Flujo de campo magnético de la celda magnética en función de la intensidad de corriente.

El flujo de campo magnético (B) en la celda magnética del reómetro utilizado está directamente relacionado con la intensidad de corriente (I), la Figura 13 muestra la línea de ajuste polinómica de segundo orden para el campo magnético para los datos que fueron proporcionados por el software Rheoplus® del Reómetro.

Figura 12. Flujo de campo magnético en función de la intensidad de corriente



Fuente: Las autoras

ANEXO D. Análisis térmico

El análisis térmico se realizó como base para un plan de contingencia a la hora de las mediciones con campo magnético, con el fin de lograr disminuir el error y procurar la veracidad en los resultados, teniendo en cuenta que las muestras a tratar en la experimentación presentan alta sensibilidad a la temperatura; Este consistió en la toma de fotografías térmicas a la celda magneto-reológica.

A continuación, se describe el protocolo usado y los resultados arrojados:

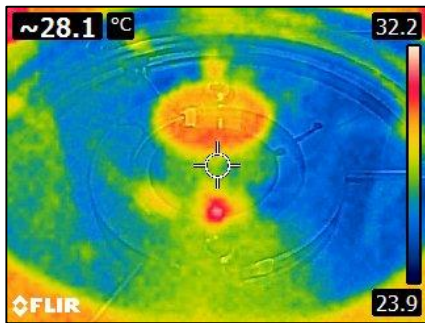
1. La muestra se dejó en reposo por 30 minutos para lograr homogenizar la temperatura en todos los puntos de la muestra.
2. Se realizaron pruebas a 30°C bajo la influencia de campo magnético por intervalos de 1, 5 y 10 minutos a 5 A, y se tomaron fotografías antes y después de la exposición al campo, este procedimiento se realizó a la celda vacía y la celda con muestra.
3. Inicialmente se analizó la muestra de crudo pesado que se utilizó en el experimento, luego el procedimiento se repitió para las muestras de aceite mineral y agua, para objeto de comparación.
4. Adicional a esto, se tomaron mediciones del incremento de temperatura en tiempo real durante el intervalo de exposición al campo (1,5 y 10 minutos).

Se obtuvieron los siguientes resultados:

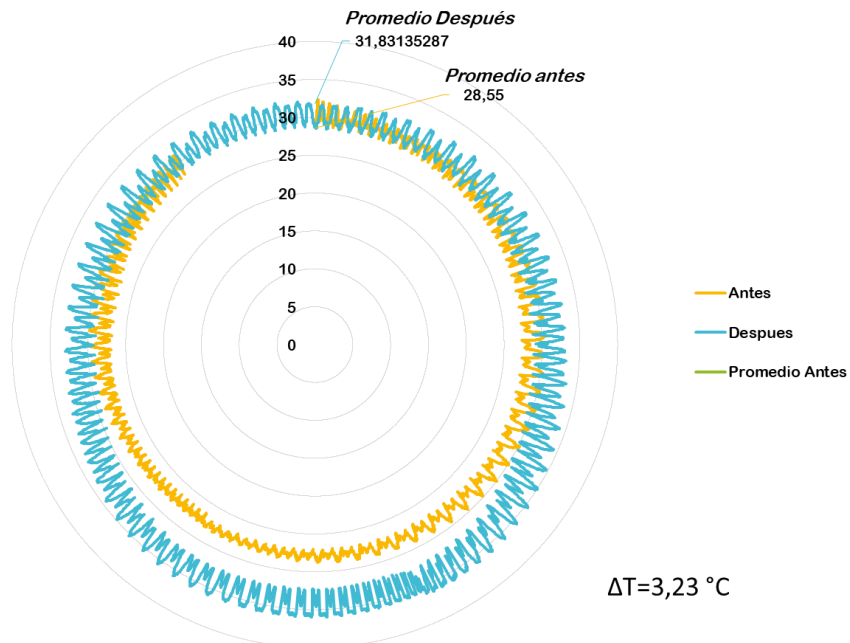
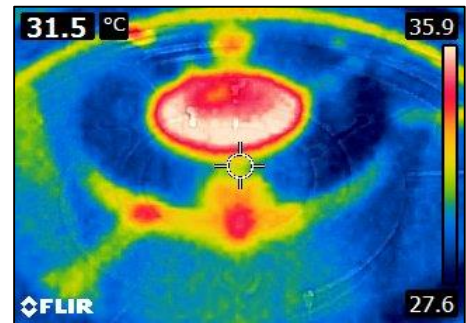
El crudo a reporto un aumento de temperatura de hasta 3,3°C en un pulso de 10 minutos a 5 A, por su parte el aceite mineral y el agua, expuestos a las mismas condiciones incrementaron su temperatura en 5,55 y 5,1 °C.

➤ **CRUDO PESADO PULSO 10 MINUTOS 5 A**

ANTES

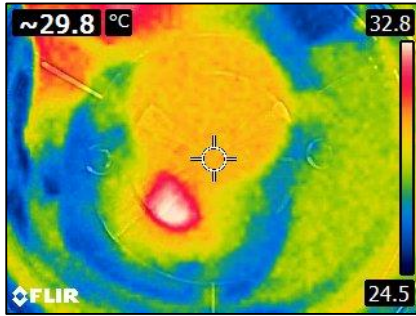


DESPUÉS

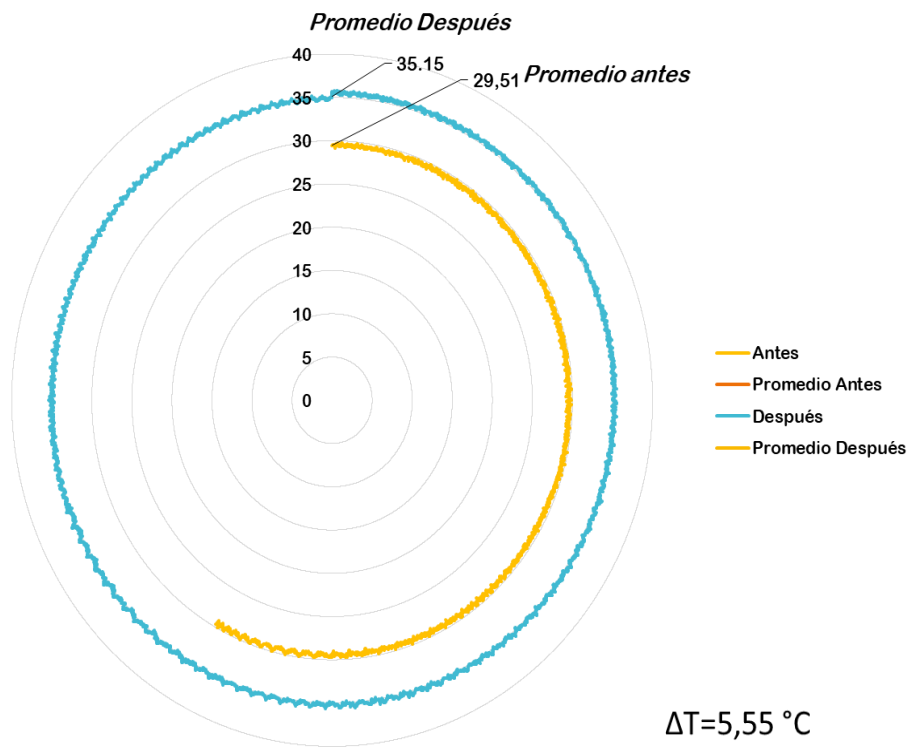
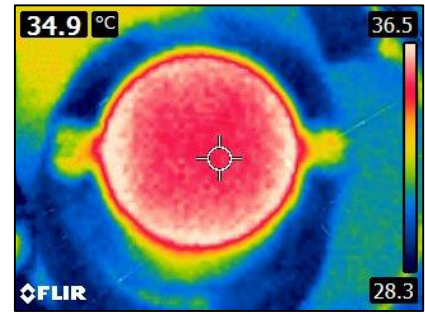


➤ ACEITE MINERAL PULSO 10 MINUTOS 5 A

ANTES

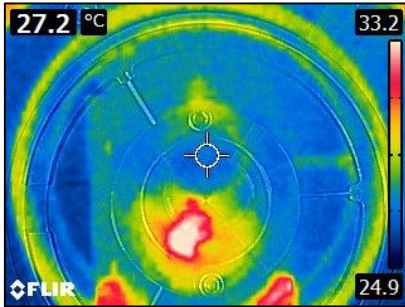


DESPUÉS

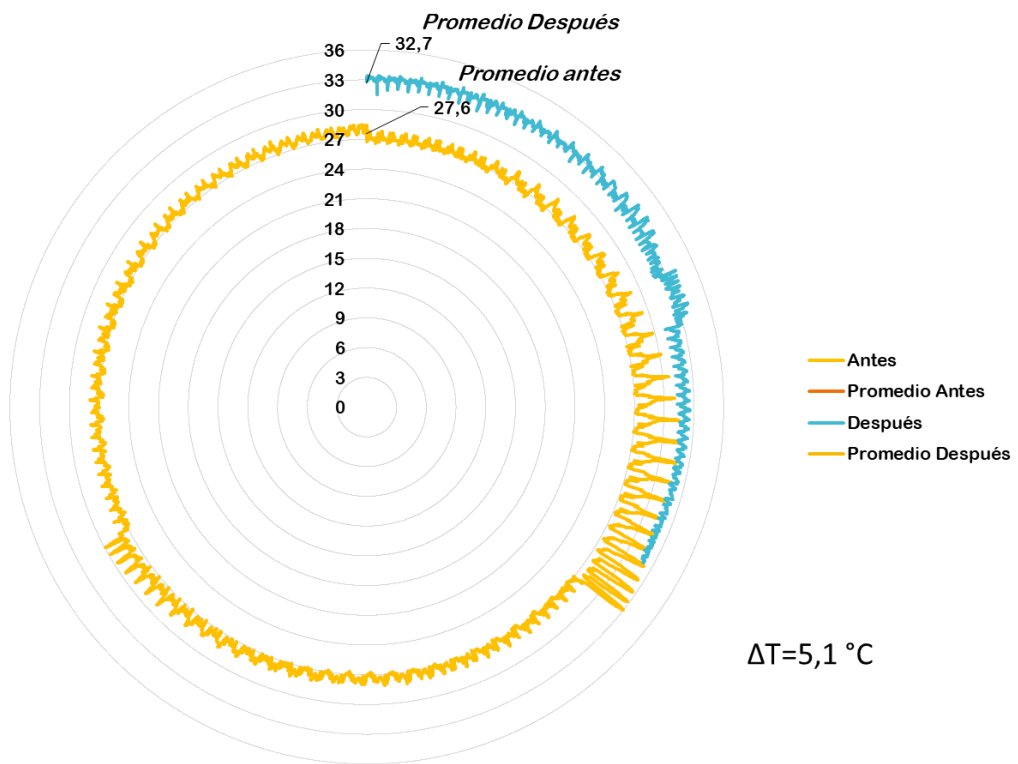
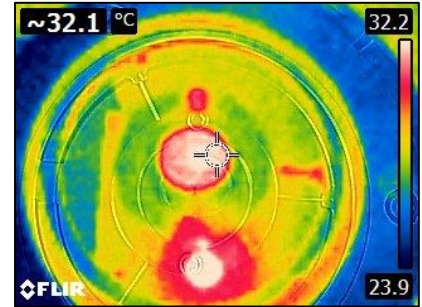


➤ AGUA PULSO 10 MINUTOS 5 A

ANTES



DESPUÉS



ANEXO E. Modelos reológicos

Tabla 5. Modelos reológicos

Modelo	ecuacion	parámetros
Cross	$\mu = \mu_{\infty,\gamma} + \frac{\mu_{0,\gamma} - \mu_{\infty,\gamma}}{1 + (\alpha_c \gamma)^m}$	μ (Pa.s): Viscosidad
		γ (s ⁻¹): Tasa de corte
		α_c (s): Tiempo de relajación característico
		m: constante
		$\mu_{\infty,\gamma}$ (Pa.s): Viscosidad a velocidad de corte infinita
		$\mu_{0,\gamma}$ (Pa.s): Viscosidad a velocidad de corte de cero R-cuadrado
Carreau	$\mu = \mu_{\infty,\gamma} + (\mu_{0,\gamma} - \mu_{\infty,\gamma}) [1 + (\gamma \lambda)^2]^{\frac{n-1}{2}}$	μ (Pa.s): Viscosidad
		γ (s ⁻¹): Tasa de corte
		$\mu_{0,\gamma}$ (Pa.s): Viscosidad a velocidad de corte de cero
		$\mu_{\infty,\gamma}$ (Pa.s): Viscosidad a velocidad de corte infinita
		n: índice de comportamiento
		R-cuadrado

ANEXO F. Curvas en estado transitorio con campo magnético.

Figura 13. Nanopartículas 0,1% y 0,2% expuestas a diferentes intensidades de corriente por 2,5 minutos sin ajuste

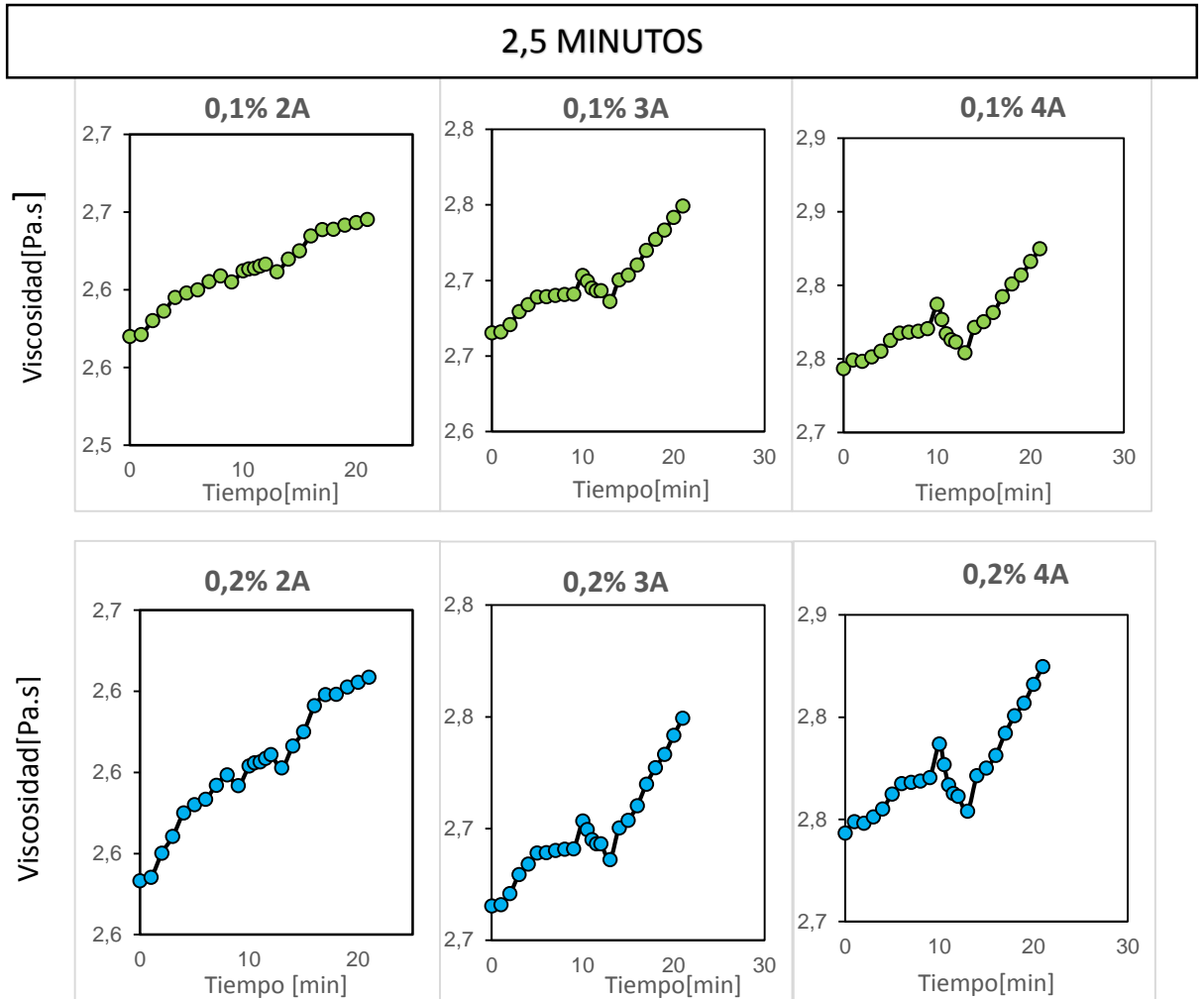
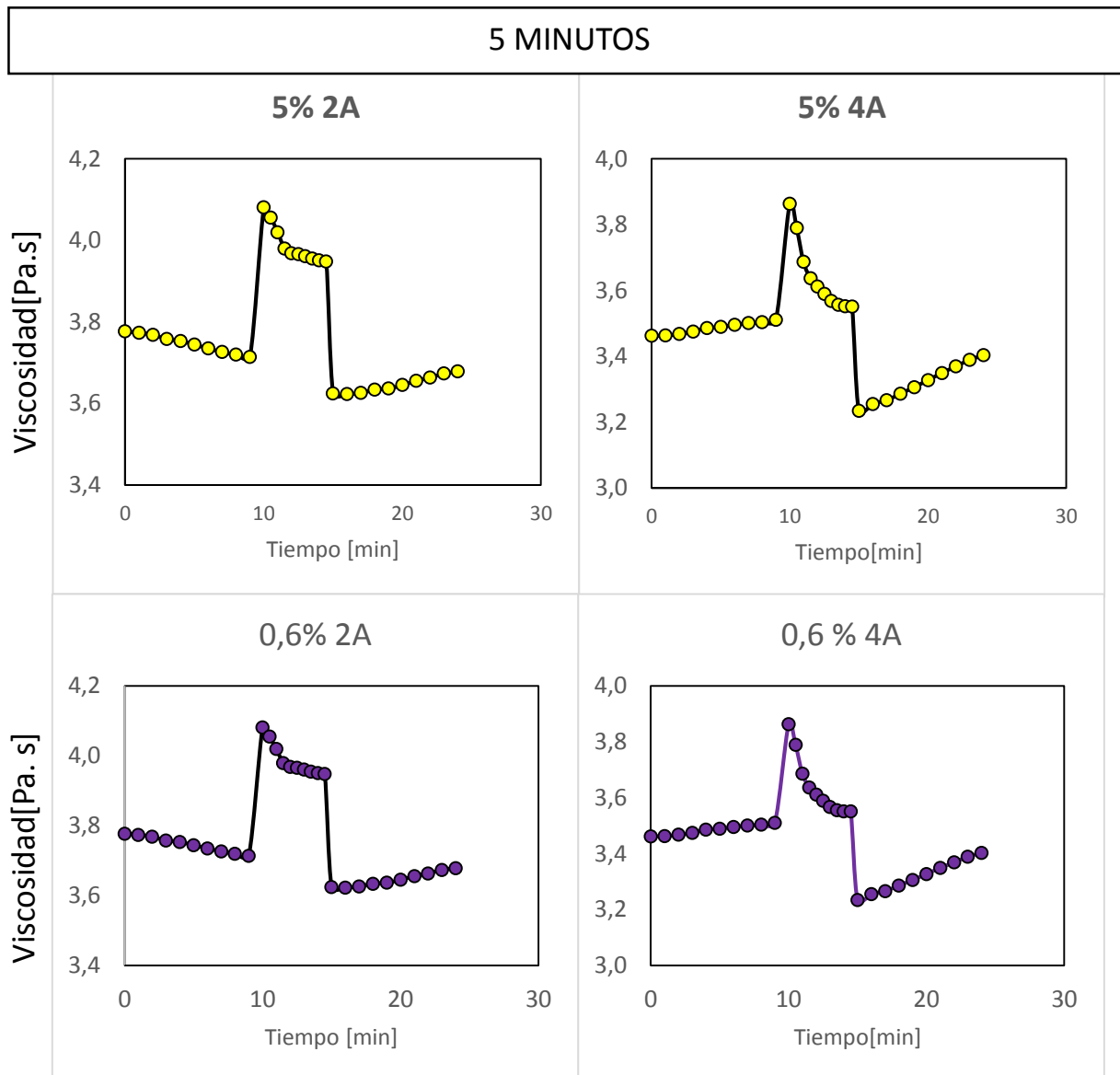
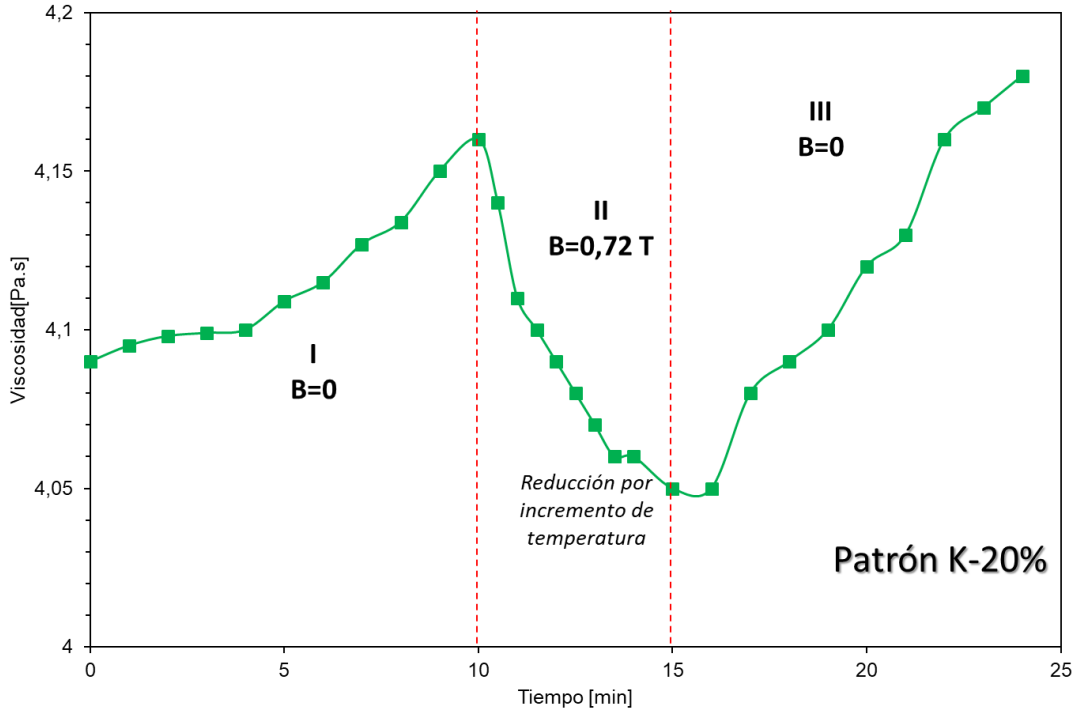


Figura 14. Nanopartículas 5% y 0,6% expuestas a diferentes intensidades de corriente por 5 minutos sin ajuste



ANEXO G. Muestra patrón a campo magnético: Ajuste viscosidad efectiva.

Figura 15. Corrección de temperatura en muestra patrón K-20%



La viscosidad ($\mu_{Efectiva}$) indica el valor de viscosidad neto sin efecto de la temperatura. El factor de ajuste consistió en calcular el porcentaje de reducción de la viscosidad de la muestra patrón, comparando los valores de viscosidad en el tiempo con campo magnético y en ausencia del mismo. La ecuación 9 describe el ajuste.

$$\mu_{ajuste} = \left(\frac{\mu_{0-k20\%} - \mu_{c-k20\%}}{\mu_{0-k20\%}} \right) * 100 \quad (9)$$

Donde, $\mu_{0-k20\%}$ y $\mu_{c-k20\%}$ son la viscosidad del patrón en ausencia y con un pulso de campo, respectivamente.

Por otra parte, en cada muestra se calculó el porcentaje de modificación de la viscosidad con respecto a su valor inicial ($t=0$). En la región ii y iii, se sumó el factor de ajuste μ_{ajuste} anteriormente descrito. La Ecuación 10 ilustra lo anterior.

$$\mu_{Efectiva} = \left(\frac{\mu_0 - \mu_i}{\mu_0} \right) * 100 + \mu_{ajuste} \text{ (en II y iii)} \quad (10)$$