

Evaluación reológica de crudos pesados colombianos bajo la influencia de campos eléctricos  
externos

Brayan Steven Quitián Espinosa

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

Arlex Chaves Guerrero

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

**Tabla de contenido**

Introducción .....	7
2. Objetivos .....	8
2.1. Objetivo General .....	8
2.2. Objetivos Específicos.....	8
3. Estado del arte.....	9
4. Metodología .....	14
4.1. Materiales.....	15
4.2. Evaluación reológica.....	15
4.2.1. Curvas de flujo (viscosidad en función de la velocidad de cizalla) .....	17
4.2.2. Barridos de amplitud y de frecuencia .....	17
4.3. Ensayos rotacionales con campos eléctricos.....	18
4.4. Ensayos oscilatorios con campos eléctricos .....	18
5. Resultados .....	19
5.1. Evaluación reológica.....	19
5.2. Evaluación electro-reológica .....	25
5.2.1. Viscosidad contra tiempo con intensidad de campo eléctrico constante .....	25
5.2.2. Módulos dinámicos contra tiempo con campo eléctrico de intensidad constante .....	29
5.2.3. Viscosidad contra intensidad del campo eléctrico .....	31
6. Conclusiones .....	35
7. Recomendaciones .....	37
Referencias bibliográficas.....	38

**Lista de Tablas**

Tabla 1. <i>Fracciones de saturados (S), aromáticos (A), resinas (R), asfaltenos (A), y volátiles (V) en las cinco muestras de crudo.</i> .....	20
Tabla 2. <i>Parámetros de ajuste al modelo ley de potencia de Oswald de Weale.</i> .....	21

### Lista de Figuras

Figura 1. <i>Diagrama metodológico</i> .....	14
Figura 2. <i>Diagrama celda electro-reológica (ERD): Reómetro MCR 302, Anton Paar</i> .....	16
Figura 3. <i>Diagrama de flujo del protocolo de acondicionamiento</i> .....	17
Figura 4. <i>Curvas de flujo (viscosidad en función de la velocidad de deformación)</i> .....	20
Figura 5. <i>Barridos de amplitud a una frecuencia constante de <math>\omega = 10</math> rad/s</i> .....	23
Figura 6. <i>Curvas de cizalla oscilatoria a una amplitud constante de <math>\gamma = 1</math> %</i> .....	24
Figura 7. <i>Cambio relativo de viscosidad en función del tiempo a tasa de cizallamiento constante de <math>\dot{\gamma} = 10</math> s<sup>-1</sup>, en ausencia y presencia de un pulso eléctrico de <math>E = 1800</math> V (II)</i> ..	25
Figura 8. <i>Módulos elásticos y viscosos a una amplitud y frecuencia constantes de <math>\gamma = 1</math> % y <math>\omega = 10</math> rad/s respectivamente, en ausencia y presencia de un pulso eléctrico de <math>E = 1800</math> V (II)</i> .....	29
Figura 9. <i>Cambio relativo de viscosidad en función del tiempo, aplicando una rampa lineal de densidad de campo eléctrico de 0 a 1800 V/mm a diferentes tasas de cizallamiento a) <math>\dot{\gamma} = 10</math> s<sup>-1</sup>, b) <math>\dot{\gamma} = 15</math> s<sup>-1</sup>, c) <math>\dot{\gamma} = 25</math> s<sup>-1</sup></i> .....	33
Figura 10. A. <i>Cambio relativo de viscosidad en función del tiempo, aplicando una rampa logarítmica de densidad de flujo magnético de 1,85 a 875,61 mT a diferentes tasas de cizallamiento 10 s<sup>-1</sup>, 50 s<sup>-1</sup>, 70 s<sup>-1</sup>. B. Efecto de la densidad de flujo magnético constante y uniforme (B) a una tasa de cizallamiento de 70 s<sup>-1</sup>. *</i> .....	34

## Resumen

**Título:** Evaluación reológica de crudos pesados colombianos bajo la influencia de campos eléctricos externos. \*

**Autor:** Brayan Steven Quitián Espinosa. \*\*

**Palabras Clave:** Reología, Electrorreología, Viscosidad, Crudo Pesado, Viscoelasticidad.

**Descripción:** Los crudos pesados presentan comportamientos reológicos que afectan su manipulación y transporte, debido a características como la viscosidad y la viscoelasticidad, especialmente en condiciones de bajo cizallamiento. Una alternativa explorada para mejorar estas propiedades es la aplicación de campos eléctricos externos, los cuales podrían influir en el comportamiento de los componentes internos del crudo, promoviendo cambios en la microestructura y, por ende, en sus propiedades macroscópicas. Sin embargo, la influencia de estos campos sobre la viscoelasticidad, la tixotropía y otros fenómenos dependientes del tiempo en los crudos ha sido poco investigada en profundidad. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de campos eléctricos externos en las propiedades reológicas de crudos pesados, enfocándose en la viscosidad y viscoelasticidad en función de la intensidad del campo y las condiciones de cizallamiento. Para ello, se utilizó el reómetro MCR302 de Anton Paar, adaptado para la aplicación de campos eléctricos controlados.

Se realizaron pruebas de viscosidad bajo variación de velocidad de cizallamiento e intensidad de campo eléctrico además de ensayos de viscoelasticidad dinámica en función de frecuencia y amplitud en presencia y ausencia de este campo. Los resultados permiten determinar cómo el campo eléctrico afecta la viscosidad y viscoelasticidad, así como el grado en que estos efectos dependen de la intensidad y tipo de crudo. Se observó, en ciertos casos, una reducción en la viscoelasticidad y en la tixotropía, promoviendo una transición hacia un comportamiento más próximo al de un fluido newtoniano. Asimismo, factores como la composición SARA, el contenido de asfaltenos, las características de las ceras y la estructura microestructural inicial condicionan significativamente la respuesta de cada crudo. Este descubrimiento subraya la complejidad de los sistemas de hidrocarburos y la necesidad de estrategias personalizadas en su tratamiento.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos.

### Abstract

**Title:** Rheological evaluation of Colombian heavy crude oils under the influence of external electric fields.\*

**Author:** Brayan Steven Quitián Espinosa.\*\*

**Keywords:** Rheology, Electrorheology, Viscosity, Heavy Crude Oil, Shear Stress.

**Description:** Heavy and light crude oils exhibit rheological behaviors that affect their handling and transportation due to characteristics such as viscosity and viscoelasticity, especially under low shear conditions. One explored alternative to improve these properties is the application of external electric fields, which could influence the behavior of the crude's internal components, promoting changes in the microstructure and, consequently, in its macroscopic properties. However, the influence of these fields on viscoelasticity, thixotropy, and other time-dependent phenomena in crude oils has not been extensively investigated. This research aims to evaluate the effect of external electric fields on the rheological properties of heavy crudes, focusing on viscosity and viscoelasticity as a function of field intensity and shear conditions. For this purpose, the Anton Paar MCR302 rheometer was used, adapted for the application of controlled electric fields.

Viscosity tests were conducted under varying shear rates and electric field intensities, along with dynamic viscoelasticity tests as a function of frequency and amplitude in the presence and absence of the field. The results allow us to determine how the electric field affects viscosity and viscoelasticity, as well as the extent to which these effects depend on field intensity and crude type. In certain cases, a reduction in viscoelasticity and thixotropy was observed, promoting a transition toward behavior closer to that of Newtonian fluid. Additionally, factors such as SARA composition, asphaltene content, wax characteristics, and initial microstructural arrangement significantly influence each crude's response. This finding highlights the complexity of hydrocarbon systems and the need for customized treatment strategies.

---

\* Degree Work.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor in Chemical Engineering. Codirector: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Doctor in Product and Process Engineering.

## Introducción

En los últimos años, el desarrollo económico, social, político y tecnológico ha incrementado la demanda mundial energética. En la actualidad, los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) abastecen más del 80% de la energía mundial y cerca del 40% corresponde al petróleo (Energy Institute, 2023). La dependencia del petróleo es notable y es una de las problemáticas más abordadas en el siglo XXI. Ante este panorama, se ha impulsado una transición energética global, mediante el uso y desarrollo de energías renovables (hidroelectricidad, paneles solares, molinos de viento, etc.); sin embargo, este tipo de alternativas no alcanza a suministrar el 3% de la demanda mundial (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2013).

En este sentido, la reducción de reservas de campos petroleros, específicamente la escasez de crudos livianos, ha fomentado el desarrollo y mejora de las técnicas actuales de recobro de recuperación de campos afectados por precipitación de parafinas y el desarrollo de técnicas para mejorar el transporte de crudos pesados y extrapesados dado que son altamente viscosos. La viscosidad de un hidrocarburo pesado ( $12^{\circ}$ - $20^{\circ}$  API) se encuentra en rangos entre 100-10.000 cP, mientras que los extrapesados ( $7^{\circ}$ - $12^{\circ}$  API) tienen viscosidades entre 10.000-8.000.000 de cP; por ende, la extracción, transporte y procesamiento presentan un reto en la industria.

Se estima que el 70% de las reservas mundiales corresponden a crudos pesados y el 30% a petróleos convencionales (International Energy Agency, 2023). En Colombia, la situación no es diferente, la Agencia Nacional de Hidrocarburos estima un total de 2.074 millones de barriles de crudo en el país, donde un 61% de este valor hace parte de las reservas de crudo pesado. La necesidad de nuevas tecnologías para mejorar la movilidad de crudos pesados en la industria nacional se hace urgente, debido al constante incremento de producción de este tipo de hidrocarburo. Una de las opciones reportadas en la literatura se fundamenta en

la aplicación de campos eléctricos al crudo. Se ha demostrado que la aplicación modifica las propiedades del crudo de manera beneficiosa para el transporte, alterando la viscosidad, punto de fluidez y punto de nube (Chaves *et al.*, 2013; Evdokimov & Losev, 2010). Por consiguiente, se plantea en el presente proyecto el estudio del comportamiento reológico de crudos pesados bajo la influencia de un campo eléctrico externo uniforme.

Ante esta situación se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuál es el efecto de la aplicación de campos eléctricos en las propiedades reológicas (viscosidad y módulos viscoelásticos) de crudos pesados de Colombia?*

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Evaluar el efecto de campos eléctricos externos sobre el comportamiento reológico de crudos pesados colombianos.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Determinar si existe cambio en el comportamiento reológico de crudos pesados colombianos cuando son expuestos a un campo eléctrico estático.

Identificar el efecto de las variables de control (intensidad del pulso, temperatura y tiempo de aplicación), sobre las variables de respuesta (viscosidad y módulos dinámicos) en los crudos en donde se obtuvo una respuesta positiva.

Evaluar el efecto del campo eléctrico sobre el comportamiento reológico de los crudos observados respecto a los resultados reportados en otras investigaciones, y la aplicación de esta técnica en el aseguramiento de flujo de crudos.

### 3. Estado del arte

En los últimos años, los hidrocarburos pesados han tomado relevancia en la industria petrolera. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), se espera que la demanda global de crudo pesado aumente en un 10% para 2027, en comparación con los niveles del 2022. Ante este panorama, se ha impulsado la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de este recurso.

Colombia, por su parte, tiene un gran potencial en la producción de crudo pesado; cerca del 61% de las reservas del país se constituyen por este tipo de hidrocarburos. De acuerdo con informes realizados por Ecopetrol, en la actualidad se desarrollan diferentes proyectos con el objetivo de mejorar y aumentar la producción de los tipos de hidrocarburos en las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja. Ricardo Roa, presidente de Ecopetrol, estima destinar cerca de \$27 billones de pesos colombianos en la ejecución de estas obras (Forbes Colombia, 2024).

Sin embargo, los hidrocarburos pesados presentan grandes retos en términos de transporte, desarrollo, producción e inversión de infraestructura, debido a su alta viscosidad (10.000 cP-1.000.000 cP) y baja gravedad API (< 20° API) (Ramírez & Quiñones, 2020). Por otro lado, existe una problemática paralela con respecto a los hidrocarburos livianos, que, ante cambios de temperatura a valores inferiores al punto de nube, se produce la precipitación de las parafinas y, por consiguiente, la formación de depósitos en las líneas de producción (Alhejaili *et al.*, 2023), llegando a generar hasta el taponamiento. Por lo tanto, se hace necesaria la investigación e implementación de nuevas tecnologías en búsqueda del mejoramiento de flujo.

Particularmente, es común abordar el problema de la alta viscosidad de los crudos pesados mediante la mezcla de estos crudos con hidrocarburos más ligeros. En su estudio sobre la optimización del transporte por oleoducto de crudo pesado de campo Castilla, Peralta *et al.*

(2017) presentan una metodología que permite estimar el caudal máximo de crudo del campo Castilla al cual puede fluir en régimen laminar usando la menor cantidad de Nafta como diluyente. Asimismo, es importante mencionar que, para poder aplicar este método, es necesario estudiar y revisar la factibilidad y compatibilidad con las viscosidades y temperaturas. Resaltando que, la desventaja principal de esta alternativa radica en tener una fuente de aceite o gas diluyente estable y en cantidades necesarias para suplir la operación.

Ante dicha situación se han propuesto diferentes métodos de mejoramiento de flujo, entre los cuales se encuentran tratamientos mecánicos como la cavitación hidrodinámica, químicos, fisicoquímicos, ultrasónicos, térmicos y electromagnéticos (Yao *et al.*, 2022). Para el caso de este último, se ha evidenciado que la aplicación de campos magnéticos y eléctricos genera cambios importantes en las propiedades de flujo (viscosidad, módulos elásticos, cambio de régimen) y en el comportamiento reológico de los crudos pesados y livianos (Chaves *et al.*, 2013; Evdokimov & Losev, 2010).

No obstante, lo anterior no se trata de una tecnología nueva; su implementación ha sido una práctica establecida desde hace tiempo. La primera aplicación de campos electromagnéticos fue registrada en 1949, con la patente estadounidense US2652925 que detalla el uso de un dispositivo electromagnético para tratar problemas de incrustaciones en tuberías. Diecisiete años después, Tikhonov y Myagkov (1966) demostraron que, al tratar una mezcla de aceite y agua con un campo magnético, no sólo reducía la incrustación de sal, sino que también reducía la generación de depósitos de asfaltenos-parafina y disminuía la temperatura de aparición de ceras.

En el año 2006, Tao y Xu reportaron reducciones superiores al 30% en la viscosidad de dos crudos, uno pesado y otro liviano. Además, el efecto se mantuvo estable durante aproximadamente 12 horas después del primer contacto con el campo eléctrico, lo cual resulta positivo para aplicaciones en la industria. En su trabajo establecieron una teoría de la reducción

de la viscosidad en crudos, publicando posteriormente una serie de artículos con base en dicha teoría (Tang *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2018; Du *et al.*, 2018).

La teoría de Tao (Du *et al.*, 2018) se basa en la teoría sobre suspensiones líquidas. Para ello, es necesario ver el petróleo crudo como una mezcla de muchas moléculas diferentes. La gasolina, el queroseno y el diésel son líquidos hechos de pequeñas moléculas de hidrocarburos con una viscosidad muy baja. El resto lo forman grandes moléculas, partículas de parafina y asfaltenos, las cuales se establecen como partículas suspendidas en un líquido de baja viscosidad como son los maltenos.

Einstein (Mark & Simha, 1940) estudió por primera vez una suspensión líquida diluida de esferas uniformes no interactivas en un líquido base de viscosidad  $\eta_0$  y dedujo la siguiente expresión para la viscosidad efectiva  $\eta$  de la suspensión:

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\varphi) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $\varphi$ , es la fracción volumétrica de las partículas suspendidas. De otro lado, Krieger-Dougherty (1959) siguiendo el trabajo de Einstein, propusieron una nueva expresión para la viscosidad de suspensiones con partículas de diferentes formas y la generalizó para todas las fracciones volumétricas:

$$\eta/\eta_0 = (1 - \varphi/\varphi_m)^{-[\eta]\varphi_m} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde  $\varphi_m$  es la fracción de valor máximo permitida para empaquetar las partículas suspendidas y  $\eta$  que representa el efecto del líquido donde se suspenden las partículas sobre la viscosidad de la suspensión, de hecho, en la expresión de Einstein para la viscosidad,  $\eta = 2,5$ . La anterior expresión indica que para reducir la viscosidad de una suspensión manteniendo el valor de  $\varphi$  constante, se puede aumentar la temperatura con el fin de disminuir el valor de  $\eta_0$  o modificar la forma en que las partículas se agrupan para aumentar el valor de  $\varphi_m$ . Un alto valor

de  $\varphi_m$  y un bajo valor de  $\eta$  significa una alta libertad para las partículas suspendidas, lo que conduce a una menor disipación de energía y una menor viscosidad.

Con base en esta teoría, Tao establece tres posibles mecanismos encargados de la reducción de la viscosidad en crudos al aplicar un campo eléctrico:

1. Las partículas suspendidas (parafinas y asfaltenos) a escala nanométrica forman cadenas cortas con formas aerodinámicas a lo largo de la dirección de flujo.
2. La inducción del campo eléctrico aumenta la polidispersidad y, por lo tanto, se incrementa el valor de la fracción máxima permitida para empaquetar las partículas suspendidas  $\varphi_m$ .
3. El tamaño promedio de las partículas suspendidas aumenta (parafinas y asfaltenos) debido a la formación de aglomerados, lo que genera una reducción de la viscosidad.

Por consiguiente, las partículas a escala nanométrica que inicialmente estarán distribuidas de manera aleatoria con una alta viscosidad entraran en un estado de inducción generado por el campo eléctrico lo que hará que las partículas suspendidas se polaricen. Dichas fuerzas de interacción dipolar obligan a las partículas a escala nanométrica a agregarse en cadenas cortas de tamaño micrométrico, las cuales tendrán una alta polidispersidad y un gran tamaño.

Posteriormente, en el 2014, Nie Hong demostró que la aplicación de estos campos presenta beneficios positivos en las propiedades reológicas de los crudos, realizando una serie de pruebas de campo dentro y fuera de China, en los que se determinó que la producción asistida por campo eléctrico es completamente viable; sin embargo, los resultados experimentales varían considerablemente respecto al tipo de campo, intensidad y tiempo de tratamiento. Asimismo, se determinó que la coexistencia de parafinas, resina y asfaltenos es una condición necesaria para la aplicación del método. Siendo la relación del contenido de

resinas y asfaltenos en el efecto de modificación compleja y no una relación directa simple; un contenido de resinas demasiado alto conducirá a que el efecto de la modificación del campo eléctrico empeore Chen *et al.* (2021).

Por otro lado, Zhang *et al.* (2021), resumieron el mecanismo del tratamiento de campo eléctrico para mejorar la fluidez del crudo en dos aspectos: por un lado, después del efecto de la aplicación del campo eléctrico, el número de partículas de cristal de cera en el crudo parafínico aumenta, la distribución del tamaño de partícula se vuelve más amplia, y la viscosidad dinámica de la suspensión debería reducirse con la misma cantidad de cera precipitada; por otro lado, las partículas cargadas (asfaltenos y resinas) en el crudo se acumulan en la superficie de los cristales de cera bajo el efecto del campo eléctrico, lo que aumenta la repulsión de la doble capa entre los cristales de cera, debilita las fuerzas de van der Waals y, por lo tanto, mejora la fluidez del crudo.

Este comportamiento puede analizarse mediante la evaluación de los módulos viscoelásticos: el módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y el módulo de pérdida ( $G''$ ). El módulo de almacenamiento ( $G'$ ) representa la energía almacenada en el material durante una deformación, indicando su comportamiento elástico. Por otro lado, el módulo de pérdida ( $G''$ ) refleja la energía disipada como calor durante la deformación, asociada al comportamiento viscoso del material. Cuando  $G'$  es mayor que  $G''$ , el material exhibe un comportamiento más elástico; si  $G''$  supera a  $G'$ , predomina el comportamiento viscoso. Adicionalmente, el punto en el que  $G'$  y  $G''$  se cruzan indica el esfuerzo de cedencia del fluido, es decir, el límite a partir del cual el material comienza a fluir de manera irreversible. (Márquez, R. *et al.*, 2019)

En estudios como el de Chaves *et al.* (2013), se ha observado que la aplicación de campos eléctricos en crudos parafínicos puede modificar estos módulos, evidenciando cambios en la estructura interna del crudo y, por ende, en su comportamiento reológico. Sin embargo, los resultados pueden variar dependiendo de las características específicas del crudo y las

condiciones del tratamiento, por lo que es esencial realizar evaluaciones detalladas antes de implementar esta tecnología en la industria petrolera.

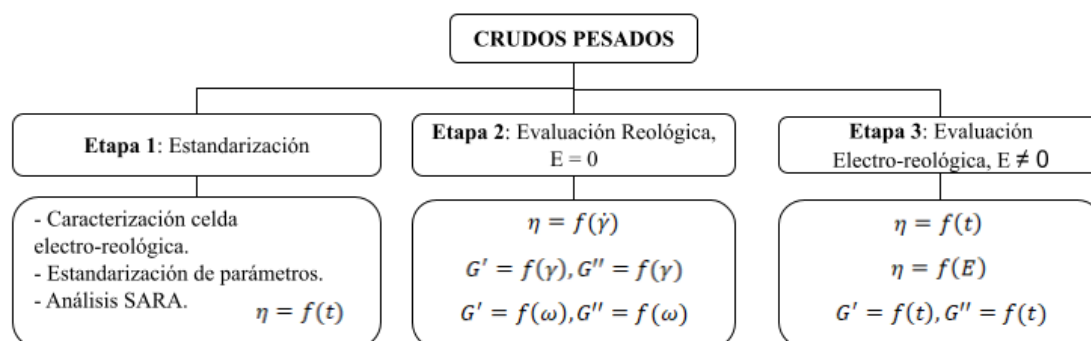
En Colombia, Contreras *et al.* (2021) del Grupo de Investigación de Fenómenos Interfaciales Reología y Simulación de Transporte de la UIS, han realizado trabajos que pretenden determinar si crudos pesados presentan una respuesta reológica natural ante campos magnéticos externos, sin embargo, no fue detectada respuesta alguna. Por tanto, ellos realizaron mezclas crudo ferrofluido (Nps Magnetita suspendidas en kerosene) encontrando que se puede inducir comportamiento magneto reológico de estas mezclas, pero en un menor grado que el ferrofluido original. Este resultado es un indicio de que en los crudos pesados tienen potencial para inducirse un comportamiento electro o magneto reológico al introducir material con capacidad de polarizarse eléctrica o magnéticamente. No obstante, en primera instancia, es necesario evaluar si estos crudos presentan naturalmente, respuesta electro-reológica lo cual justifica el desarrollo de este trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación.

#### 4. Metodología

La metodología del presente trabajo de investigación se dividió en tres grandes etapas, como se observa en la Figura 1.

#### Figura 1.

Diagrama metodológico.



En la primera etapa se realizó una estandarización de cada muestra y un ajuste preliminar del equipo, realizando curvas de calibración y curvas de viscosidades en ausencia y presencia de campos eléctricos. En la segunda etapa se realizó una evaluación reológica para entender el comportamiento de cada una de las muestras, donde se realizaron curvas de flujo, barridos de amplitud y de frecuencia. Por último, en la tercera etapa se realizó la evaluación electroreológica, en la que se realizaron curvas de viscosidad contra tiempo y curvas de los módulos contra tiempo, ambas en presencia de un pulso eléctrico, de la misma manera se realizaron curvas de viscosidad contra la intensidad de campo aplicando una rampa lineal de intensidad. A continuación, se detallan los ensayos realizados.

#### **4.1. Materiales**

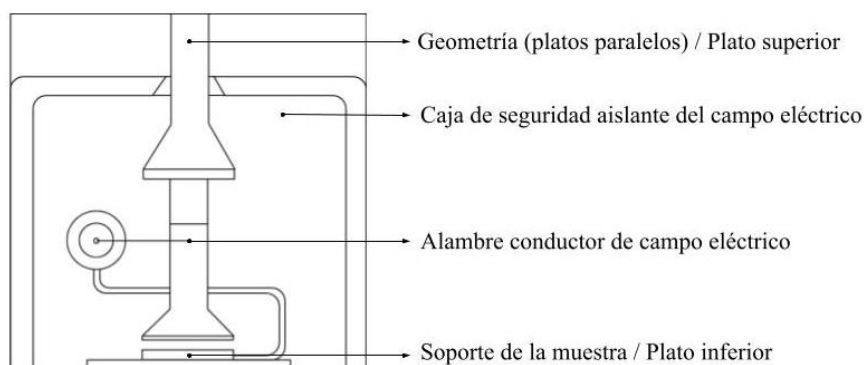
La evaluación electro-reológica se llevó a cabo con cinco muestras de crudos pesados secos colombianos de la zona de los llanos orientales. Para efectos prácticos, se utilizó la siguiente notación: HC<sub>x</sub>, donde x corresponde a la respectiva muestra de crudo (1 – 5). Los crudos fueron caracterizados por medio de un análisis SARA y se determinó la gravedad API midiendo la densidad de cada muestra.

#### **4.2. Evaluación reológica**

Las pruebas reológicas se llevaron a cabo utilizando un reómetro MCR 302 de la empresa Anton Paar dotado de una celda electro-reológica (ERD) con geometría de platos paralelos de 24,946 mm de diámetro. La celda electro-reológica es esquematizada en la Figura 2.

**Figura 2.**

*Diagrama celda electro-reológica (ERD): Reómetro MCR 302, Anton Paar.*



Note que, con el fin de generar el campo eléctrico (CE), un alambre conductor de electricidad se mantiene en contacto con la geometría de medición, fricción que debe ser corregida por una calibración que implica un procedimiento similar al de una curva de viscosidad en aire para ser restada de las curvas de viscosidad con la muestra. El reómetro también cuenta con un sistema de control de temperatura tipo Peltier, acoplado a un baño criostato-termostato JULABO F32. Asimismo, se realizó una caracterización del desempeño de la celda electro-reológica (ERD) usando un aceite estándar de la empresa Brookfield ( $\mu = 4875 \text{ m Pa}\cdot\text{s}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) con el fin de obtener el volumen de la muestra y la distancia entre platos óptimos, y también, conocer la efectividad de la corrección por fricción del alambre. Se obtuvieron las medidas más precisas de viscosidad para un volumen de muestra de  $620 \text{ }\mu\text{L}$  (medida con una pipeta de émbolo Transferpettor con un rango de  $200\text{-}1000 \text{ }\mu\text{L}$ ) y una distancia entre platos de  $1 \text{ mm}$ , por lo que fueron estandarizados estos valores durante todo el estudio.

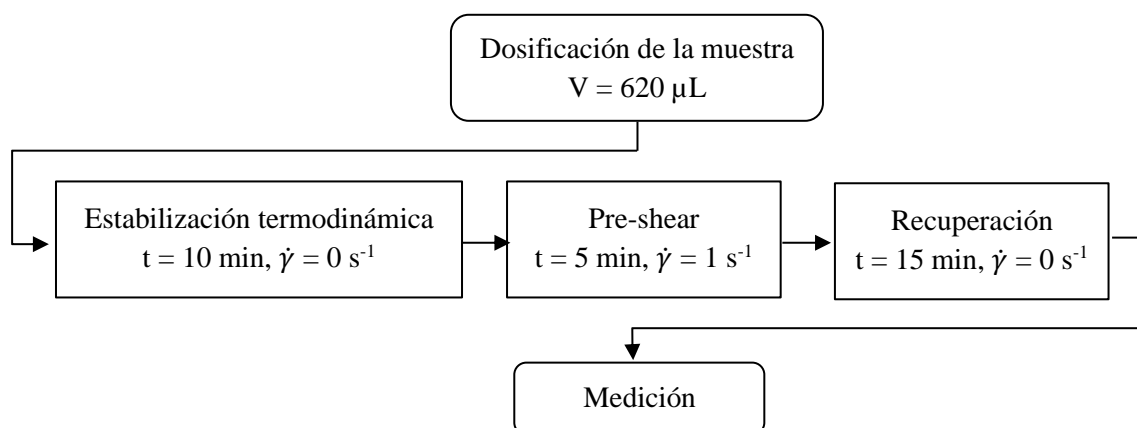
Todas las medidas reológicas posteriores, tanto rotacionales como oscilatorias, fueron realizadas por duplicado, y fueron corregidas por el efecto de la fricción del alambre con el eje del plato superior (ver Figura 2). De las pruebas realizadas, se observó que las medidas a baja velocidad de deformación deben ser evitadas. A continuación, se detallan los ensayos realizados.

#### 4.2.1. Curvas de flujo (viscosidad en función de la velocidad de cizalla)

Cada curva de flujo se realizó siguiendo un protocolo de acondicionamiento, tal como se indica en la Figura 3. Las medidas rotacionales, se realizaron en un rango de velocidad de cizallamiento de 0.01 a 100 s<sup>-1</sup>, con un incremento lineal de 0.084 s<sup>-1</sup>, registrando un total de 120 puntos. Por último, se aplicó una curva de corrección para la fricción provocada por el alambre. Los datos fueron almacenados y procesados por el Rheo Compass TM Software de Anton Paar, versión 1.19. Es importante mencionar que, en esta fase, se identificaron y seleccionaron las tasas límites de deformación para cada crudo. Al ser fluidos viscoelásticos, el uso de altas velocidades de deformación provoca la salida de la muestra de los platos generando error en las mediciones.

#### Figura 3.

*Diagrama de flujo del protocolo de acondicionamiento.*



#### 4.2.2. Barridos de amplitud y de frecuencia

Los barridos de amplitud y frecuencia se realizaron acondicionando cada muestra a una temperatura de 35 °C durante 10 minutos con el fin de mantener estabilidad termodinámica en cada una de las muestras. Los barridos de amplitud se realizaron con un rango de deformación

de 0.001 a 1 % y una frecuencia de 10 rad/s. Asimismo, se realizaron barridos de frecuencia en un rango de 0.1 a 100 rad/s y una amplitud de 1 % (deformación).

### **4.3. Ensayos rotacionales con campos eléctricos**

La evaluación electro-reológica se llevó a cabo bajo las mismas condiciones empleadas en la evaluación reológica y descritas en la Figura 3, pero en presencia de un campo eléctrico estático, uniforme, y dirigido en dirección perpendicular al flujo. La primera serie de experimentos consistió en evaluar la viscosidad en tres intervalos de tiempo a un valor constante de velocidad de deformación de  $10 \text{ s}^{-1}$ .

El primer (I) intervalo de tiempo de 10 minutos fue en ausencia del campo eléctrico, posteriormente, para el segundo intervalo (II), se aplicó un pulso eléctrico constante de 1800 V/mm de intensidad durante 5 minutos y finalmente en el intervalo de tiempo (III), se dejó transcurrir un tiempo de 15 minutos en ausencia del campo, para evaluar la recuperación estructural del material. Intensidades del campo eléctrico superiores a 1800 V/mm no fueron posibles debido a la capacidad de la red eléctrica. Realizar pruebas con intensidades del campo eléctrico superiores provocó apagados y/o pérdidas de conexión entre los equipos en el sistema de pruebas (reómetro, computador, sistema de enfriamiento y fuente de voltaje).

En la segunda serie de pruebas rotacionales, fue evaluado el efecto de la intensidad del campo eléctrico sobre la viscosidad. En este ensayo se aplicó una rampa lineal de densidad de flujo eléctrico entre 0 y 1800 V/mm a tres niveles de tasa de deformación  $\dot{\gamma}$  (10, 15 y  $25 \text{ s}^{-1}$ ).

### **4.4. Ensayos oscilatorios con campos eléctricos**

Para esta fase, el acondicionamiento previo de las muestras de crudo se limitó a alcanzar una temperatura de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 10 minutos. Posteriormente, se midieron los módulos dinámicos en tres intervalos de tiempo, manteniendo la frecuencia y la amplitud a valores constantes de 10 rad/s y 1 % respectivamente. El primer intervalo de tiempo (I) fue de 10

minutos en ausencia de campo; el segundo intervalo (II), se aplicó un pulso eléctrico de 1800 V/mm durante 5 minutos y finalmente en el intervalo (III), se dejó transcurrir un tiempo de 10 minutos en ausencia de campo, para analizar cómo se recupera el sistema después de la perturbación.

## 5. Resultados

### 5.1. Evaluación reológica

Las propiedades reológicas de un crudo son el resultado de la compleja interacción física, química y eléctrica entre sus componentes, como son las resinas, los asfaltenos y los saturados (iso y ciclo parafinas). Los crudos pesados pueden entenderse como suspensiones viscoelásticas con propiedades coloidales, en donde los constituyentes más polares y de mayor peso molecular, conocidos como asfaltenos, se distribuyen y forman agregados fractales que varían de tamaño entre 2 y 9 nm y que interactúan con otros componentes, como las resinas, que promueven su estabilidad coloidal en los maltenos (Contreras *et al.*, 2021). Adicionalmente, las diversas temperaturas de fusión de los maltenos, que oscilan entre -50 °C y 30 °C, influenciadas en gran medida por la fuente del petróleo crudo, generan cambios en el equilibrio termodinámico del sistema que provocan transiciones de fase de los maltenos, lo que afecta directamente al volumen efectivo de la fase dispersa y en últimas inducen al comportamiento reológico complejo de estas muestras (Behzadfar *et al.*, 2013; Behzadfar *et al.*, 2014).

En nuestro caso, de la Tabla 1 se puede verificar que los crudos evaluados tienen un alto contenido de asfaltenos con una concentración que varía entre 20.4 a 25 %p/p. La relación de resinas/asfaltenos y de saturados/asfaltenos es mostrada también en la tabla.

**Tabla 1.**

*Fracciones de saturados (S), aromáticos (A), resinas (R), asfaltenos (A), y volátiles (V) en las cinco muestras de crudo \*.*

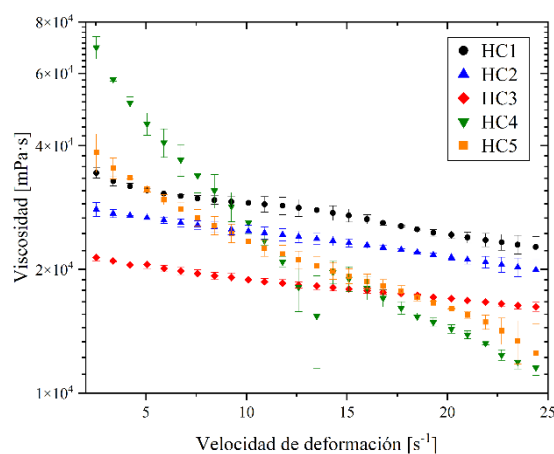
Muestra	Fracciones, %p/p							
	S	A	R	A	V	R/A	S/A	API
HC <sub>1</sub>	24,50	24,60	25,21	25,00	0,70	1,00	0,98	11,46
HC <sub>2</sub>	29,50	24,80	24,99	20,50	0,20	1,21	1,43	12,43
HC <sub>3</sub>	29,10	20,70	28,61	21,00	0,60	1,36	1,38	12,35
HC <sub>4</sub>	34,10	18,40	24,96	20,40	2,10	1,22	1,67	14,72
HC <sub>5</sub>	37,80	20,30	18,86	22,90	0,20	0,82	1,65	14,10

\* Se realizó una réplica por cada medición.

Al evaluar el efecto de la velocidad de deformación en la viscosidad de los crudos, se deduce que las cinco muestras presentan un comportamiento de flujo pseudo-plástico o fluidificante a la cizalla, es decir, presentan una disminución de la viscosidad con el incremento de la velocidad de deformación, lo cual corresponde a lo esperado (Baigorria, 2019), como se observa en las curvas de viscosidad para las cinco muestras de crudo evaluadas, Figura 4.

**Figura 4.**

*Curvas de flujo (viscosidad en función de la velocidad de deformación).*



Los datos viscosidad contra velocidad de deformación se ajustaron al modelo de ley de potencia de Oswald de Weale (Ec. 3):

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde  $m$  es el índice de consistencia,  $\tau$  corresponde al esfuerzo cortante,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación y  $n$  es el índice de flujo. Los valores de los parámetros de ajuste  $m$  y  $n$  se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Parámetros de ajuste al modelo ley de potencia de Oswald de Weale.*

<b>Muestra</b>	<b>m</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
HC <sub>1</sub>	413,39	- 0,17	0,92
HC <sub>2</sub>	331,28	- 0,12	0,94
HC <sub>3</sub>	243,91	- 0,14	0,94
HC <sub>4</sub>	1547,80	- 0,80	0,98
HC <sub>5</sub>	660,40	- 0,47	0,95

El modelo de Oswald de Weale permite modelar fluidos reofluidizantes, y en ese caso,  $n < 1$ , (Rosabal *et al.*, 1988). Debemos mencionar que el rango de evaluación de la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ) se limitó a un valor máximo de  $25 \text{ s}^{-1}$  debido a que los efectos de inercia hacen que a valores mayores las muestras se salgan de los platos, generando errores en la medición, en particular: los crudos HC<sub>1</sub>, HC<sub>2</sub> y HC<sub>3</sub> exponen este problema a valores  $\dot{\gamma} > 25 \text{ s}^{-1}$ , mientras que los crudos HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> a valores  $\dot{\gamma} > 15 \text{ s}^{-1}$ , de acuerdo con la Figura 4. Asimismo, como se observa en la Tabla 2, los valores del parámetro  $n$  para los cuatro crudos, indican una fuerte desviación del comportamiento Newtoniano ( $n = 1$ ). Los valores del parámetro  $n$  para todos los crudos son negativos, siendo los valores más bajos los de los crudos HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> en comparación con los de los crudos HC<sub>1</sub>, HC<sub>2</sub> y HC<sub>3</sub>, para los cuales son similares. Una relación inversa se observa para el caso del parámetro  $m$ , es decir, los más altos valores corresponden a los crudos HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> mientras que para los crudos son HC<sub>1</sub>, HC<sub>2</sub> y HC<sub>3</sub> son

más bajos, pero similares. Esto concuerda con que la relación de S/A es más alta para los crudos HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> con valores de 1,67 y 1,65 respectivamente.

De la misma manera, las fracciones SARA influyen significativamente en el valor de los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) y son fundamentales para comprender cómo estos crudos se comportan bajo diferentes condiciones, como variaciones de temperatura y presión durante el transporte y almacenamiento (Liu *et al.*, 2022). La composición SARA impacta directamente las propiedades viscoelásticas de los crudos. Un mayor contenido de asfaltenos generalmente se correlaciona con un aumento en  $G'$ , lo que indica una mayor capacidad para almacenar energía elástica (Santos *et al.*, 2020). Por el contrario, la presencia de saturados y otras fracciones pesadas puede aumentar la viscosidad y el módulo de pérdida (Visintin *et al.*, 2008). Esta relación sugiere que los crudos con mayor contenido de asfaltenos y resinas pueden exhibir características viscoelásticas más pronunciadas.

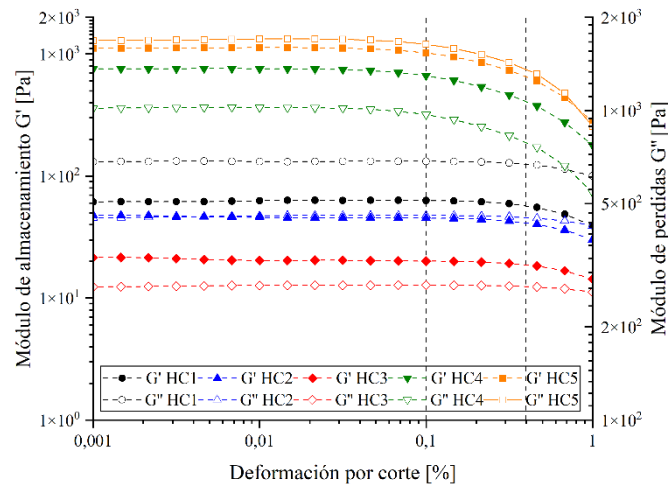
Los cambios microestructurales que ocurren durante la deformación por corte son fundamentales para comprender esta relación. Por ejemplo, la presencia de componentes cerosos en los crudos pesados puede dar lugar a la formación de una estructura similar a un gel a bajas temperaturas. A medida que se aplica un esfuerzo de corte, estas estructuras pueden ceder y descomponerse, lo que provoca una disminución tanto en  $G'$  como en  $G''$  (Jia & Zhang, 2012).

Como resultado al evaluar las propiedades viscoelásticas de las cinco muestras en la curva de barrido de deformación (Figura 5), se observa que la zona de deformación lineal se extiende desde 0.001% hasta aproximadamente 0.1 % para los crudos HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> (con la mayor relación de S/A) mientras que para los crudos HC<sub>1</sub>, HC<sub>2</sub> y HC<sub>3</sub> se extiende un poco más hasta aproximadamente 0.5%. Adicionalmente, la Figura 5 revela que en los crudos HC<sub>3</sub> y HC<sub>4</sub> es ligeramente dominante el comportamiento de gel  $G'(\gamma) < G''(\gamma)$ , en los crudos HC<sub>2</sub> y HC<sub>5</sub> el

comportamiento es tipo sol/gel  $G'(\gamma) \approx G''(\gamma)$ , y para el crudo HC<sub>1</sub> el comportamiento es de líquido viscoelástico  $G'(\gamma) < G''(\gamma)$ .

### Figura 5.

Barridos de amplitud a una frecuencia constante de  $\omega = 10$  rad/s.



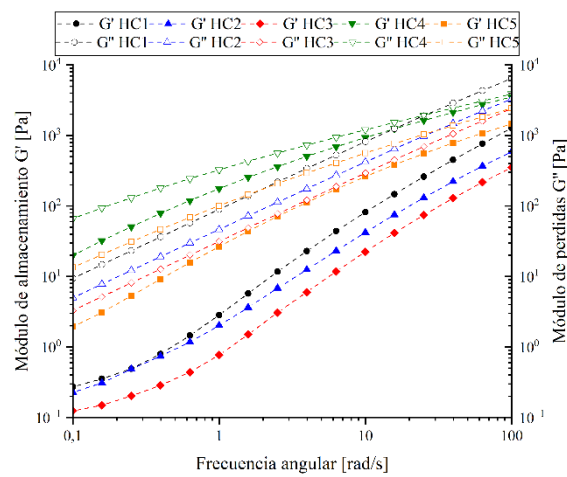
La relación entre el aumento de la deformación por corte y la disminución en la magnitud de los módulos  $G'$  y  $G''$  en crudos pesados es un aspecto fundamental para comprender su comportamiento reológico. En particular,  $G'$  tiende a disminuir a medida que  $\gamma$  aumenta, lo que indica una transición de un comportamiento más elástico a uno más fluido. De manera simultánea,  $G''$  también puede disminuir, reflejando la menor capacidad del material para disipar energía a medida que fluye más fácilmente bajo corte (Shamsa & Lines, 2014). Esta disminución en ambos módulos sugiere una ruptura de la estructura interna del crudo, que suele estar influenciada por la presencia de asfáltenos y ceras, los cuales pueden formar una red estructural dentro del fluido (Yang *et al.*, 2013). Además, el esfuerzo de cedencia, es decir, el esfuerzo requerido para iniciar el flujo también juega un papel importante; cuando la deformación por corte supera este umbral, el material entra en un régimen de flujo donde los módulos disminuyen significativamente (Dimitriou *et al.*, 2011; Jia & Zhang, 2012).

En la Figura 6, se presentan los barridos de frecuencia para las cinco muestras de crudo a una deformación constante de 1%. Estas curvas muestran que, a bajas frecuencias, el

comportamiento de líquido viscoelástico es dominante, sin embargo, como la frecuencia incrementa, ambos módulos incrementan, pero el valor de la magnitud relativa ( $G'(\gamma) - G''(\gamma)$ ) disminuye. Esto indicaría que a altas frecuencias el comportamiento de gel podría ser dominante, como ocurre con el crudo HC<sub>4</sub>, donde ambos módulos se cortan a 100 rad/s.

### Figura 6.

*Curvas de cizalla oscilatoria a una amplitud constante de  $\gamma = 1\%$ .*



El comportamiento viscoelástico de los crudos pesados está influenciado por la frecuencia de deformación aplicada. A frecuencias más altas, el tiempo disponible para la reorganización estructural de los componentes del crudo se reduce significativamente, impidiendo la relajación de la red estructurada y promoviendo un comportamiento predominantemente elástico. Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado en sistemas complejos como suspensiones coloidales y fluidos con estructuras supramoleculares, donde la respuesta elástica aumenta con la frecuencia debido a la restricción en la movilidad de las cadenas moleculares y la interacción entre asfaltenos y resinas. Consecuentemente, la tendencia hacia la elasticidad en crudos pesados bajo condiciones de alta frecuencia está asociada con la naturaleza de sus fases dispersas y la presencia de estructuras cohesivas que limitan la disipación de energía a través de procesos viscosos (Zhang *et al.*, 2022).

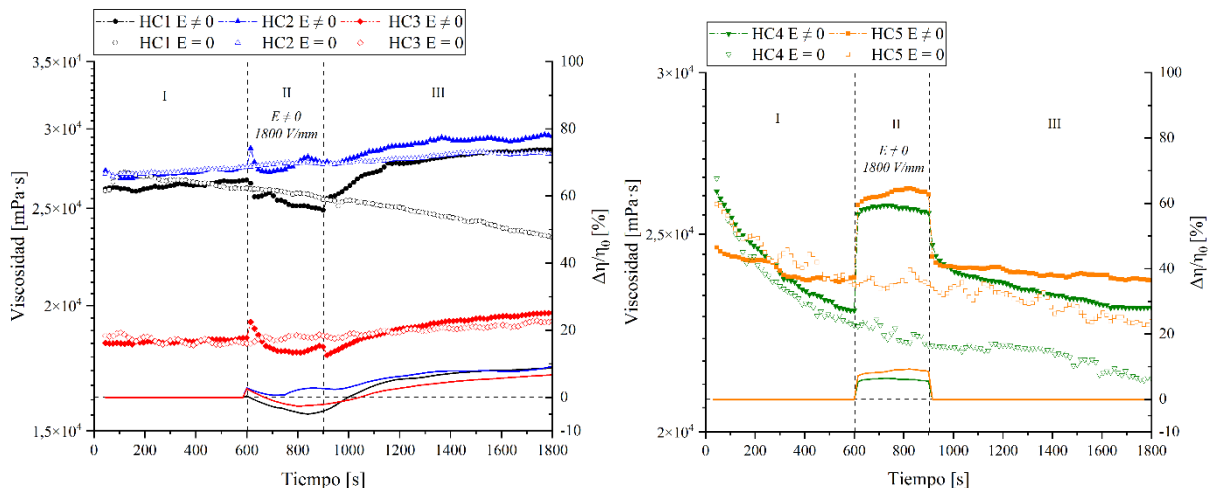
## 5.2. Evaluación electro-reológica

### 5.2.1. Viscosidad contra tiempo con intensidad de campo eléctrico constante

Con el fin de poder evidenciar el efecto del campo eléctrico, curvas de viscosidad contra el tiempo a  $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$  en ausencia y presencia de un pulso de campo eléctrico de intensidad constante son presentadas en la Figura 7 a y b. Debe ser notado que, en la ausencia del campo eléctrico, las muestras de crudo HC<sub>2</sub> y HC<sub>3</sub> muestran una tendencia a incrementar la viscosidad en el tiempo debido al esfuerzo cortante empleado (comportamiento reopéctico) mientras que las muestras HC<sub>1</sub>, HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> muestran una disminución de la viscosidad en el tiempo debido al esfuerzo cortante que puede ser asociado a un comportamiento tixotrópico.

**Figura 7.**

*Cambio relativo de viscosidad en función del tiempo a tasa de cizallamiento constante de  $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$ , en ausencia y presencia de un pulso eléctrico de  $E = 1800 \text{ V}$  (II).*



En las pruebas con pulso eléctrico, este se aplicó en el intervalo de tiempo de 600 a 900 s (II). En primera instancia, resulta sorprendente que los cinco crudos respondieron al campo eléctrico cambiando la viscosidad. Este resultado contrasta con el hecho de que ninguno de estos crudos presentó cambios en su comportamiento reológico por el efecto de un campo magnético de manera natural. Se requiere de la adicción de nanopartículas magnéticas para

inducir el comportamiento magneto viscoso, como fue demostrado por Contreras *et al.* (2021) para estos mismos crudos.

Sin embargo, la respuesta al campo eléctrico observada en los cinco crudos no es uniforme, cambia en intensidad y en forma, es decir, unos responden reduciendo la viscosidad (efecto electroreológico negativo) mientras que otros la incrementan (efecto electroreológico positivo). En particular, el grado de disminución de la viscosidad, siguió el orden  $HC_1 > HC_3 > HC_2$  (5%, 2.5% y 1% respectivamente). De hecho, el crudo  $HC_2$  durante el tiempo en que el campo eléctrico estuvo activo, presentó un incremento de la viscosidad, seguida por un periodo de tiempo de reducción y posteriormente un nuevo aumento de la viscosidad que igualó el valor de la viscosidad sin campo. Por el contrario, la muestra  $HC_3$  inició incrementando la viscosidad para luego reducirla hasta que el campo eléctrico fue retirado.

También son notables los cambios en el comportamiento reológico después que el campo eléctrico fue retirado (intervalo III), por ejemplo, los crudos  $HC_2$  y  $HC_3$  siguieron su comportamiento natural de incremento de la viscosidad en el tiempo, pero este fue mayor en la prueba con aplicación del campo eléctrico en el intervalo II, con respecto al incremento de la viscosidad en el tiempo de las pruebas sin campo. El cambio más drástico fue en el crudo  $HC_1$ , en el cual después de retirar el campo eléctrico, su comportamiento cambio a incremento de la viscosidad en el tiempo, en comparación con la prueba sin campo eléctrico que siempre mostró una reducción de viscosidad con el tiempo. En contraste, los crudos  $HC_4$  y  $HC_5$  mostraron un incremento de la viscosidad (o efecto electroreológico positivo) como respuesta a la aplicación del campo eléctrico (intervalo II), el cual fue superior en magnitud en comparación con los crudos que mostraron el efecto electroreológico negativo (crudo  $HC_1$ ). En relación con el periodo III, la viscosidad de los crudos  $HC_4$  y  $HC_5$  una vez retirado el campo fue mayor a la que tenía antes de su aplicación, aunque la tendencia a disminuir en el tiempo la viscosidad se mantuvo.

Debe ser notado que en el intervalo II, el comportamiento reológico fue más estable para los crudos que incrementaron la viscosidad que para los que la disminuyeron. Esto muestra una complicada y “lenta” estructuración de los componentes del crudo, en comparación a fluidos electrorreológicos en los cuales los cambios en viscosidad se dan en tiempos de milisegundos. Por otro lado, la comparación con la aplicación de tratamientos eléctricos en crudos parafínicos muestra que, en los crudos pesados de este estudio, el tiempo de recuperación de la viscosidad es mucho más corto, considerando que algunos autores han observado tiempos de recuperación de la viscosidad de varias horas. Por otro lado, en crudos parafínicos, la literatura muestra la disminución de la viscosidad por efecto del campo eléctrico como la respuesta más común, con unas muy pocas excepciones donde la viscosidad incrementa.

Una disminución de la viscosidad bajo un campo eléctrico estático también ha sido observada en fluidos electrorreológicos, aunque una explicación del mecanismo no ha sido completamente definida. Algunas teorías muestran que un efecto magneto reológico positivo o negativo depende de los valores relativos de la conductividad y permitividad eléctrica de las partículas respecto a la del fluido que las contiene. Es decir, cuando la conductividad de las partículas es mayor que la del líquido se dan las condiciones para la formación de cadenas de partículas estables que generan un efecto electrorreológico positivo (Contreras *et al.*, 2021).

Por el contrario, partículas con conductividad eléctrica menor que la del líquido, generan un comportamiento electrorreológico negativo, cuyo mecanismo aún no está completamente definido. Algunos investigadores proponen el efecto de electroforesis, en el cual las partículas se cargan con los iones de las sustancias del crudo haciendo que se carguen y migren hacia los electrodos generadores del campo eléctrico. Esto hace que en las zonas alejadas de los electrodos haya una menor cantidad de partículas disminuyendo la viscosidad (Akuma & Charles, 2012; Shunxiang *et al.*, 2019).

Otra posible explicación es la generación de una rotación espontánea de las partículas conocida como “Quincke rotation”. Según Jones (1984) y Peters *et al.* (2004), esto consiste en la rotación espontánea de pequeñas partículas sólidas aislantes suspendidas en un medio de baja conductividad en presencia de un campo eléctrico de corriente continua (DC). La mecánica que explica el fenómeno se ha descrito de la siguiente manera:

Bajo un campo eléctrico de corriente continua, las cargas libres del líquido viajan hacia los electrodos y se acumulan en la interfase sólido-líquido de la partícula (polarización de Maxwell-Wagner), induciendo un momento dipolar  $P$ . Cuando el tiempo de relajación de carga del líquido, definido como  $\tau_l = \frac{\epsilon_l}{\sigma_l}$  es menor que el del sólido, definido como  $\tau_s = \frac{\epsilon_s}{\sigma_s}$ , es decir, cuando,  $\tau_l < \tau_s$ , la dirección de  $P$  es opuesta al vector del campo eléctrico  $E$ . Esta diferencia de  $180^\circ$  en la dirección entre  $E$  y  $P$  genera un torque eléctrico sobre la partícula (Ec. 4) el cual intenta alinear el momento dipolar  $P$  con el campo eléctrico  $E$ .

$$T^e = P \times E = |P_{eff}| E \sin \alpha \quad (\text{Ec. 4})$$

Se ha considerado que las partículas giran alrededor de un eje perpendicular al vector del campo eléctrico. El torque eléctrico es contrarrestado por el torque viscoso ejercido por el fluido sobre la esfera (Ec. 5). Esto representa el acoplamiento entre la electrodinámica y la hidrodinámica.

$$T^v = 8\pi\mu R^3 \omega \quad (\text{Ec. 5})$$

Usando la condición de estabilidad marginal y las expresiones para  $T^e$  y,  $T^v$  Jones (1984) obtuvo una expresión para el valor crítico de la intensidad del campo eléctrico a partir del cual comienza la rotación espontánea de la partícula.

Este fenómeno, sugiere que la interacción entre la permitividad y la conductividad de las partículas y el fluido desempeña un papel clave en la respuesta electroreológica. En el caso

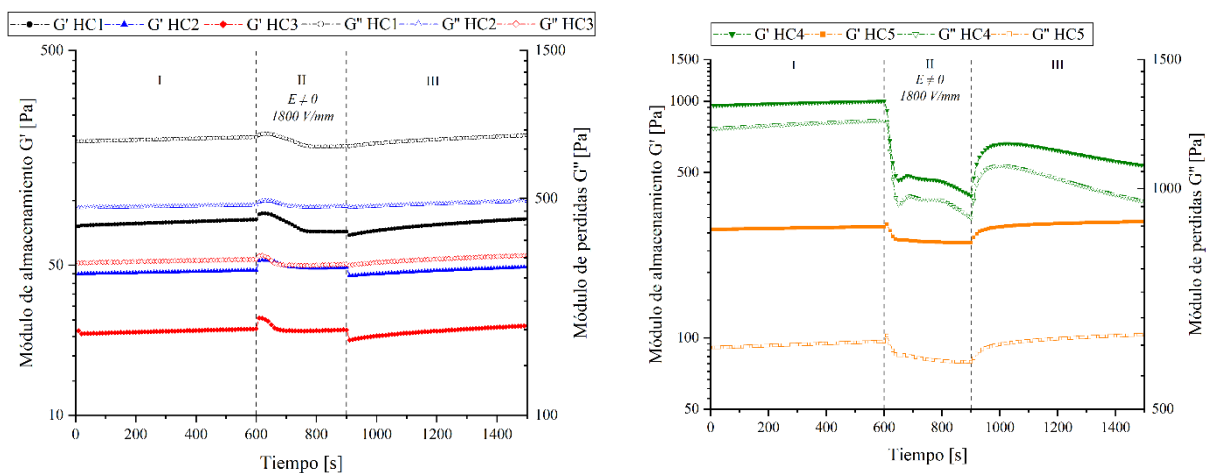
de los crudos estudiados, la complejidad de su composición puede influir en la aparición de este efecto, lo que explica la variabilidad observada en la respuesta reológica bajo la aplicación de un campo eléctrico.

### 5.2.2. Módulos dinámicos contra tiempo con campo eléctrico de intensidad constante

Con el fin de evidenciar el efecto del campo eléctrico en las propiedades viscoelásticas de los crudos, comportamiento de los módulos de almacenamiento y pérdidas contra el tiempo en ausencia y presencia del campo eléctrico de intensidad constante son presentadas en la Figura 8. Al igual que en las pruebas rotacionales, el pulso eléctrico se aplicó en el intervalo de tiempo que va de 600 a 900 s (II) a 1800 V/mm. Los comportamientos observados en los ensayos realizados (Figura 8) sugieren una alteración en la respuesta viscoelástica de las cinco muestras.

**Figura 8.**

*Módulos elásticos y viscosos a una amplitud y frecuencia constantes de  $\gamma = 1\%$  y  $\omega = 10$  rad/s respectivamente, en ausencia y presencia de un pulso eléctrico de  $E = 1800$  V (II).*



La Figura 8a muestra que los crudos HC<sub>1</sub>, HC<sub>2</sub>, HC<sub>3</sub> se caracterizan por presentar un comportamiento similar en ambos módulos (G' y G'') antes y durante la aplicación del campo eléctrico. En general, para todos los periodos de tiempo evaluados y en los tres crudos el valor

de  $G'(\gamma) < G''(\gamma)$ , contrastando con el comportamiento de los crudos HC<sub>4</sub>, HC<sub>5</sub> en los cuales  $G'(\gamma) > G''(\gamma)$ . Sin embargo, en los cinco crudos en el periodo de tiempo I, se observa el incremento en el valor de ambos módulos con el tiempo. El intervalo de tiempo II se caracteriza por un incremento inicial en el valor de  $G'$  al aplicar el campo eléctrico, para luego disminuir su valor, siendo el crudo HC<sub>1</sub> el que presentó un mayor cambio durante el periodo de aplicación del campo eléctrico (II). Este comportamiento podría ser un indicativo de un rápido proceso de formación de cadenas o de aglomerados de mayor tamaño que inicialmente incrementan la viscosidad (Figura 8) seguido por un proceso de relajación viscoelástica adicional generado por el campo eléctrico.

Un comportamiento similar fue observado por Contreras *et al.* (2021) para mezclas de crudo-ferrofluido en presencia de un campo magnético, con la excepción de que siempre se observó un incremento de viscosidad. Adicionalmente, este resultado muestra que la reorganización a nivel estructural de los componentes del crudo pesado inducidos por el campo eléctrico requiere de un tiempo mayor al observado en fluidos electrorreológicos lo cual es potenciado por el comportamiento viscoelástico del sistema estudiado en ausencia del campo. Por último, al instante de retirar el campo eléctrico (final de II) el valor de  $G'$  cae de manera instantánea (situación que no se observa para  $G''$ ) para luego empezar a incrementar en una clara indicación de la tendencia hacia una recuperación estructural previa a la aplicación del campo eléctrico. En definitiva, el crudo HC<sub>1</sub> es el mayormente afectado por la presencia del campo.

Una situación marcadamente diferente es presentada en los crudos HC<sub>4</sub>, HC<sub>5</sub> en los cuales para el intervalo II se observó una fuerte disminución en la magnitud de ambos módulos, indicando un cambio mayor en el comportamiento viscoelástico. No obstante, una detallada observación durante este periodo de tiempo muestra que: i) el crudo HC<sub>4</sub> tiene una mayor respuesta que el crudo HC<sub>5</sub> y ii) que durante el intervalo II el valor de  $G'$  del crudo HC<sub>4</sub> sigue

disminuyendo, mientras que el del crudo HC<sub>5</sub> mantiene un valor. De nuevo esto podría ser un efecto de la formación de cadenas de partículas o aglomerados de asfaltenos en la dirección de aplicación del campo eléctrico que implican el incremento de la viscosidad, generando, de nuevo una relajación viscoelástica del fluido.

Estos resultados resaltan el hecho de que la aplicación del campo eléctrico modifica la distribución y disposición de las partículas cargadas dentro del fluido. Esta reorganización tiende a aumentar las fuerzas de cohesión que actúan entre la fase dispersa (asfaltenos, ceras) y la fase continua (la matriz del crudo), afectando así a las propiedades elásticas y viscosas del crudo. Además, se observa que el efecto del campo eléctrico es más significativo en aquellas muestras que, en su estado inicial, presentan un comportamiento predominantemente elástico en comparación con el viscoso. Esto sugiere que la interacción entre las partículas cargadas y la matriz del fluido podría reforzar las estructuras internas responsables del almacenamiento de energía elástica. En reposo, estas muestras podrían comportarse como fluidos de Bingham, requiriendo un esfuerzo umbral para iniciar el flujo, lo que indicaría la formación de una estructura interna más resistente a la deformación. Estos hallazgos refuerzan la idea de que el campo eléctrico no solo altera la viscosidad del crudo, sino que también modula su respuesta mecánica en función de su estado reológico inicial.

### **5.2.3. Viscosidad contra intensidad del campo eléctrico**

Los efectos específicos de la intensidad del campo eléctrico y la duración de la exposición al campo eléctrico desempeñan un papel fundamental en la modulación de estas interacciones moleculares y las propiedades reológicas resultantes de los crudos pesados. Como ya hemos hecho notar, pocos estudios se han centrado en el comportamiento electroreológico de crudos pesados. Por ejemplo, Tang *et al.* (2011) proponen que un campo eléctrico controlado, las partículas de asfaltenos y parafinas se reorganizan en configuraciones

más favorables que mejoran el deslizamiento de las capas de fluido entre sí con una tensión de cizallamiento mínima. Esto se traduce en una reducción de la viscosidad efectiva del crudo, mejorando así su fluidez. De hecho, en un estudio realizado por Zhang *et al.* (2021) para crudos livianos, encontró que las intensidades de campos eléctricos más elevadas pueden dar lugar a mayores reducciones de la viscosidad, que suelen correlacionarse con un aumento del módulo elástico. No obstante, en este trabajo, se ha notado que el campo eléctrico también genera el incremento a una intensidad fija de la viscosidad.

Por otro lado, Zhang *et al.* (2017) subrayan la necesidad de una modelización exhaustiva para comprender cómo se producen estas transiciones reológicas bajo diferentes velocidades de cizallamiento y aplicaciones de campos eléctricos. Lo que sugiere que la respuesta de la viscosidad del crudo bajo un campo eléctrico también puede estar ligada a la velocidad de deformación. A diferentes velocidades de cizallamiento, la ruptura estructural de los grupos de asfaltenos y cera se produce de forma variable. Sin embargo, velocidades de cizallamiento elevadas pueden provocar una ruptura más profunda de estos cúmulos, lo que resulta en una mayor dispersión de las moléculas de petróleo, que en última instancia reduce la viscosidad efectiva.

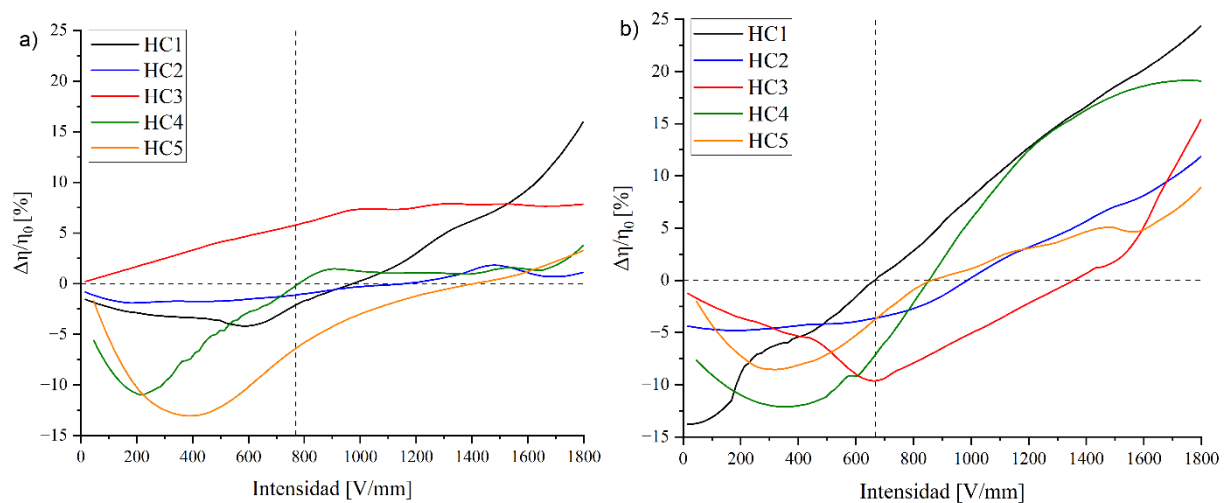
Esto contrasta a los resultados obtenidos en la Figura 9, donde se observa, que los crudos presentan un mayor cambio en la viscosidad bajo unas tasas de deformación mayores, lo cual es contrario al comportamiento magneto viscoso de ferrofluidos, en los cuales el cambio de viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de corte. Esto puede ser asociado al fuerte comportamiento viscoelástico de estos crudos mientras que ferrofluidos son Newtonianos en ausencia del campo. Como se puede ver de la Figura 9, entre mayor es el valor de la velocidad de deformación mayor es el rango de intensidad de campo eléctrico donde se da la reducción de la viscosidad, asociada al proceso de relajación viscoelástica. En esta zona, hay una competencia entre el comportamiento viscoelástico y el efecto electroreológico siendo

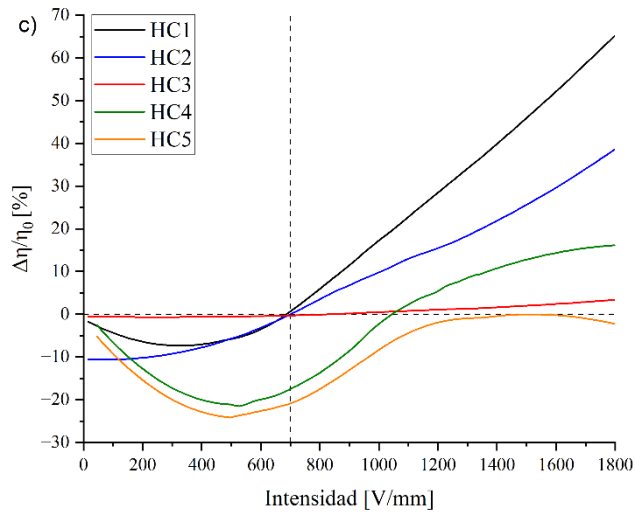
similares. A medida que la intensidad del campo y la velocidad de deformación incrementan, generando un rompimiento en la estructura del material, el efecto viscoelástico se reduce y el efecto electroreológico empieza a dominar. Observando la Figura 9c ( $\dot{\gamma} = 25 \text{ s}^{-1}$ ), se ve que el crudo HC<sub>1</sub> tiene un fuerte incremento de la viscosidad con el campo eléctrico de aproximadamente 65%, seguido por el HC<sub>2</sub> con aproximadamente 39% con una dependencia lineal.

También es notable de estos resultados que, bajo esta condición, los crudos tienden a mostrar que en el rango de 0 a 600 V/mm hubo un decrecimiento de la viscosidad como en el caso de pulso eléctrico de intensidad constante, mientras que el crudo HC<sub>3</sub> el comportamiento reopéctico tendió a desaparecer. De hecho, en los crudos HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub>, que en las pruebas a valor constante de campo magnético mostraban incremento de la viscosidad, en este caso de campo eléctrico incrementando, se observó una disminución de la viscosidad en el rango de 0 a aproximadamente 667 V/mm, y a partir de este valor incrementó.

### Figura 9.

*Cambio relativo de viscosidad en función del tiempo, aplicando una rampa lineal de densidad de campo eléctrico de 0 a 1800 V/mm a diferentes tasas de cizallamiento a)  $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$ , b)  $\dot{\gamma} = 15 \text{ s}^{-1}$ , c)  $\dot{\gamma} = 25 \text{ s}^{-1}$ .*

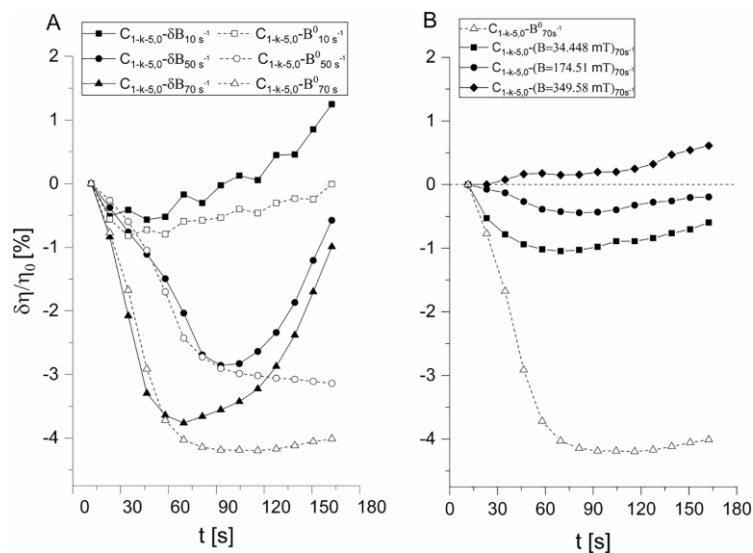




Por otro lado, la dependencia de la viscosidad con el campo en el crudo HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub> no es clara. A bajas velocidades de deformación mantiene una estructura fuerte que impide una reorganización de las partículas o aglomerados, mientras que, a altas velocidades de deformación hay un rompimiento de las estructuras que permiten que el campo eléctrico actúe libremente sobre las partículas o agregados. Contreras *et al.* (2021), observó este mismo comportamiento con estos mismos crudos mezclados con ferrofluido, como se muestra en la Figura 10.

**Figura 10.**

A. Cambio relativo de viscosidad en función del tiempo, aplicando una rampa logarítmica de densidad de flujo magnético de 1,85 a 875,61 mT a diferentes tasas de cizallamiento 10 s<sup>-1</sup>, 50 s<sup>-1</sup>, 70 s<sup>-1</sup>. B. Efecto de la densidad de flujo magnético constante y uniforme (B) a una tasa de cizallamiento de 70 s<sup>-1</sup>. \*



\* Tomado de "Rheological implications of the inclusion of ferrofluids and the presence of uniform magnetic field on heavy and extra-heavy crude oils", por Contreras, M., 2021, *Fuel*, vol. 285, pp. 119184.

## 6. Conclusiones

La caracterización reológica de los crudos mostró un comportamiento de flujo pseudo-plástico o fluidificante a la cizalla para todas las muestras, el cual se ajusta al modelo de ley de potencia de Oswald de Weale. Se observó que los crudos con una mayor relación S/A (HC<sub>4</sub> y HC<sub>5</sub>) presentaron valores más bajos en el índice de flujo  $n$ , indicando un mayor grado de comportamiento no newtoniano, y valores más altos en el índice de consistencia  $m$  lo que sugiere una mayor resistencia al flujo.

Mediante la aplicación de campos eléctricos, se evidenció que los cinco crudos analizados modifican su comportamiento de manera diferenciada, manifestando cambios sutiles, en viscosidad y propiedades viscoelásticas, pero importantes ya que no se observan en ausencia del campo eléctrico. Se registró un aumento máximo en la viscosidad del 11.88 % posterior a la aplicación del pulso eléctrico, del 9.16 % en el periodo de aplicación, y del 65.16 % en la aplicación de un campo eléctrico lineal. Lo que contrasta con lo reportado por Contreras *et al.* (2021), investigación en la que ninguno de estos crudos presentó cambios en su comportamiento reológico por el efecto de un campo magnético de manera natural, si no que se requirió de la adicción de nanopartículas magnéticas para inducir el comportamiento magneto viscoso.

Se determinó una relación directa entre la intensidad del campo eléctrico y la respuesta electro-reológica. Lo mismo ocurre con el efecto generado por la tasa de cizallamiento, que, a diferencia de los ferrofluidos, donde la viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de corte, en estos crudos se observa un mayor cambio en la viscosidad a tasas de deformación más altas.

Esto se debe a su fuerte comportamiento viscoelástico, mientras que los ferrofluidos presentan un comportamiento Newtoniano en ausencia de un campo.

El crudo HC<sub>1</sub> presentó el mayor cambio de viscosidad en los ensayos realizados, esto puede estar relacionado con la proporción relativa de saturados y asfaltenos en la respuesta reológica del crudo, siendo este crudo el que presenta una composición más homogénea (R/A = 1, S/A = 0,98) en comparación con las demás muestras. No obstante, y siendo conscientes de que se requiere de una cantidad mayor de experimentación para explicar de manera rigurosa el efecto de la composición inicial de la muestra en la respuesta electro-reológica, con base en los resultados obtenidos y lo reportado en la literatura podemos proponer lo siguiente: i) la coexistencia de partículas de cristales de cera, coloides y asfaltenos es la condición necesaria para el tratamiento con campos eléctricos. ii) El efecto del contenido de coloides y asfaltenos en el tratamiento con campos eléctricos es complejo, pero no monótono. Lo que concuerda con lo reportado por otros investigadores (Zhang *et al.*, 2021; Miao Q. *et al.*, 2013; Homayuni *et al.*, 2011)

Cabe destacar que todas las muestras de crudos mostraron un efecto electro-reológico de manera natural, a pesar de la magnitud de las fuerzas viscosas y los mecanismos de adsorción que podrían contribuir a dificultar las interacciones eléctricas. Sin embargo, se requiere más investigación para evaluar la aplicabilidad de este enfoque sinérgico, que podría permitir el control y la mejora de las propiedades reológicas de los crudos en diferentes etapas de transporte y producción, reduciendo así el consumo de energía asociado al bombeo.

## 7. Recomendaciones

Se recomienda explorar un sistema de pruebas que permita aumentar la capacidad de la red eléctrica de manera controlada. Este estudio demostró que la intensidad del campo eléctrico tiene un impacto significativo en la respuesta electro-reológica. En particular, aumentar la intensidad del campo eléctrico en un rango de 0.2 a 0.5 kV/mm podría mejorar sustancialmente los resultados.

Asimismo, se recomienda investigar alternativas para ampliar el rango de tasas de deformación, evitando problemas como la expulsión de la muestra del plato. También es importante realizar ensayos que evalúen el efecto de la temperatura, estudios previos han demostrado que la aplicación de campos eléctricos en temperaturas cercanas a la aparición de ceras puede generar un impacto positivo en la respuesta electro-reológica. Esto sugiere la necesidad de estudiar en profundidad la microestructura inicial de la muestra y su relación con la respuesta electro-reológica. Este factor podría ser determinante para comprender el uso de los campos eléctricos como estrategia para mejorar el flujo de crudos.

Finalmente, se recomienda llevar a cabo una evaluación reológica detallada para analizar el efecto del campo eléctrico en el comportamiento reológico de las muestras. Para ello, sería conveniente realizar análisis de histéresis y otros estudios que permitan descartar la influencia de factores externos, como la tixotropía o la reopexia, en los cambios de viscosidad observados. Asimismo, sería valioso evaluar el efecto de los campos eléctricos con una mayor diversidad de la composición inicial de las muestras, realizando una evaluación reológica con muestras de crudo liviano y/o medios, considerando su composición inicial, así como la posible presencia de metales, azufres, entre otros componentes.

**Referencias bibliográficas**

- O. Akuma & O. Charles. Electrocoalescence of Field Crude Oil using High voltage Direct Current. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 4. 2012.
- A. Alhejaili, E. Bell, N. Daraboina. "Paraffin Deposition in Production Lines: Effect of Operating Parameters on Deposition Characteristics," *Energy & Fuels*, vol. 37, no. 23, pp. 18642-18651, 2023. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c03282.
- O. Baigorria. "Estudio del comportamiento reológico de crudos pesados y su vinculación con la presencia de asfaltenos," *Repositorio Digital Institucional*, Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Trabajo final, 2019.
- Behzadfar E, Hatzikiriakos SG. Rheology of bitumen: Effects of temperature, pressure, CO2 concentration and shear rate. *Fuel* 2014;116:578–87.
- Behzadfar E, Hatzikiriakos SG. Viscoelastic properties and constitutive modelling of bitumen. *Fuel* 2013;108:391–9.
- C. Chen, J. Zhang, Y. Xie, Q. Huang, Y. Ding, Y. Zhuang, M. Xu, S. Han, Z. Li, H. Li. "An investigation to the mechanism of the electrorheological behaviors of waxy oils," *Chemical Engineering Science*, vol. 239, pp. 116646, 2021.
- Chenbo Ma, Yingda Lu, Chaohui Chen, Kai Feng, Zixin Li, Xinyi Wang, and Jinjun Zhang. "Electrical Treatment of Waxy Crude Oil to Improve Its Cold Flowability," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 38, pp. 10920-10928, 2017. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02140.
- A. Chaves, J. Rey, J. Pinzón, E. Ariza, C. Jiménez. "Estudio de la influencia de un campo eléctrico externo en la movilidad de crudos parafínicos," *Fuentes: El Reventón Energético*, vol. 11, no. 2, pp. 79-85, 2013.

- M. Contreras, M. López, E. Ariza, A. Chaves. “Rheological implications of the inclusion of ferrofluids and the presence of uniform magnetic field on heavy and extra-heavy crude oils,” *Fuel*, vol. 285, pp. 119184, 2021.
- Dimitriou, C. J., McKinley, G. H., & Venkatesan, R. “Rheo-piv analysis of the yielding and flow of model waxy crude oils,” *Energy & Fuels*, vol. 25, no. 7, pp. 3040-3052, 2011. DOI: 10.1021/ef2002348.
- Dong, X., Liu, H., Wang, Q., Pang, Z., & Wang, C. “Non-newtonian flow characterization of heavy crude oil in porous media,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 43-53, 2012. DOI: 10.1007/s13202-012-0043-9.
- E. Du, R. Tao, Q. Zhao, Y. Xiao. “Electric Field Suppressed Turbulence and Reduced Viscosity of Paraffin Based Crude Oil Sample,” *Arch Pet Environ Biotechnol*, 2017: APEB-122. DOI: 10.29011/2574-7614.100122.
- E. Du, Q. Zhao, Y. Xiao, R. Tao. “Reducing viscosity of ultra-low sulfur diesel with electric field,” *Am J Aerosp Eng*, vol. 5, no. 1, pp. 56-62, 2018.
- E. Du, Q. Zhao, Y. Xiao, L. Cai, R. Tao. “Electric field suppressed turbulence and reduced viscosity of asphaltene base crude oil sample,” *Fuel*, vol. 220, pp. 358-362, 2018.
- Energy Institute. “2023 Statistical Review of World Energy”. 2023. [Online]. Available: <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- Forbes Colombia. “Le estamos apostando a poder mantener estos altos niveles de producción, dice presidente de Ecopetrol,” 2024. [Online]. Available: <https://forbes.co/2024/03/01/negocios/ricardo-roa-presidente-de-ecopetrol-habla-resultados-ingresos-utilidades-2023>
- Homayuni F., Hamidi A., Vatani A., Shaygani A., Faraji Dana R. Viscosity reduction of heavy and extra heavy crude oils by pulsed electric field [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2011, 29(19):2052-2060.

- Hu, R., Crawshaw, J. P., Trusler, J. P. M., & Boek, E. S. “Rheology and phase behavior of carbon dioxide and crude oil mixtures,” *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 6, pp. 5776-5784, 2016. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b01858.
- Igor N. Evdokimov and Aleksandr P. Losev. “Electrical Conductivity and Dielectric Properties of Solid Asphaltenes,” *Energy & Fuels*, vol. 24, no. 7, pp. 3959-3969, 2010. DOI: 10.1021/ef1001887.
- International Energy Agency. “World Energy Outlook 2023.” 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Jia, B. and Zhang, J. “Yield behavior of waxy crude gel: effect of isothermal structure development before prior applied stress,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 51, no. 33, pp. 10977-10982, 2012. DOI: 10.1021/ie301047g.
- I. Krieger, T. Dougherty. “A Mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres,” *Trans. Soc. Rheol.*, vol. 3, pp. 137–152, 1959.
- Lesueur D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Adv Colloid Interf Sci* 2009;145(1-2): 42–82.
- Liu, H., Xu, Y., Chen, H., Zhang, J., & Jingyu, X. “Viscoelastic behavior and constitutive relation of heavy crude oils,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 35, pp. 30816-30822, 2022. DOI: 10.1021/acsomega.2c02234.
- H. Mark, R. Simha. “Viscosity and molecular structure,” *Nature*, vol. 145, pp. 571-573, 1940.
- Marquez, R. Forgiarini, A. Salager, J-L. “Fundamentos de reología interfacial,” Cuaderno FIRP S530-A, modulo de enseñanza de fenómenos interfaciales, V.1., Universidad de los Andes, 2019.
- Miao Q, Zhang C. N., Gao X. L., Yan F. Experimental study on improving flowability of high viscous and gelled crude oil with electromagnetic method[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2013, 32(11):1167-1170

- Nie, C. H. On the feasibility of applying electric field to increase oil recovery in old oil field. *Advanced Materials Research*, 900, 677-680, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.900.677>
- A. Peralta, J. Blanco, J. Reina, L. Mantilla. “Transporte de crudo pesado por oleoducto usando el método de dilución: un enfoque práctico para modelar la caída de presión y la precipitación de asfaltenos,” *Fuentes: El Reventón Energético*, vol. 15, no. 2, pp. 7, 2017. DOI: 10.18273/revfue.v15n2-2017001.
- P. Ramírez, S. Quiñones. “Rheological Behavior of Heavy and Extra-Heavy Crude Oils at High Pressure,” *Energy & Fuels*, vol. 34, no. 2, pp. 1268-1275, 2020. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b02867.
- J. Rosabal, L. Garcell. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. Editorial Pueblo y Educación, Tomo I, La Habana, Cuba, 1988.
- Shamsa, A. and Lines, L. “Effect of oil composition on fluid substitution in heavy oil reservoirs,” *Geophysical Prospecting*, vol. 63, no. 2, pp. 422-441, 2014. DOI: 10.1111/1365-2478.12147.
- R. Tao, X. Xu. “Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field,” *Energy & Fuels*, vol. 20, no. 5, pp. 2046-2051, 2006.
- Unidad de Planeación Minero-Energética. “Cadena del petróleo,” ISBN No. 978-958-8363-25-7, 2013.
- Yang, F., Li, C., & Wang, D. “Studies on the structural characteristics of gelled waxy crude oils based on scaling model,” *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 3, pp. 1307-1313, 2013. DOI: 10.1021/ef301921b.
- Xia, S., Veony, E., & Kostarelos, K. (2019). Electro-deposition for asphaltene removal during heavy oil upgrading. *RSC Advances*, 9(12), 6596-6602. <https://doi.org/10.1039/c8ra10514f>

Zhang, J. J., Li, H., Huang, Q., Yiwei, X., Chaohui, C., Chenbo, M. A., & Chaoyue, Z. (2021). Progress of research on electric field treatment technology for modification of crude oil. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 40(11), 1201-1209.