



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudios de Compatibilidad y Estabilidad de  
Crudos que se Mezclan en Terminal**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Petrolero**

**PRESENTA**

César Alberto Flores Ramírez

**ASESOR DE INFORME**

M.C. Alfredo Luna García



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



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



Un agradecimiento a PEMEX y a su subsidiaria PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN, ya que sin su aprobación no hubiera sido posible el desarrollo de este trabajo; y especialmente al M.C. Alfredo Luna García por su asesoría y apoyo incondicional.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme la oportunidad y su apoyo incondicional.

A mi abuela, María del Carmen González Macías, por ser mi soporte e inspiración.

A mis padres, Lourdes Ramírez González y Octavio Flores Marin, a quienes quiero y admiro mucho, por todo.

A mis hermanos, Diego Flores, Paulina Flores, Sandra Flores y Octavio Flores, por jamás haberme dejado solo y por su cariño.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México por su resguardo.

A mi director de este trabajo, el Ing. Erick Gallardo Ferrera, por la dedicación contribuida en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Samaniego Verduzco, por su apoyo y dirección brindada durante esta etapa.

A mi asesor, M.C. Alfredo Luna García, por sus enseñanzas, apoyo y por la oportunidad de presentar este trabajo.

A mis amigos del Petrobowl y de la Facultad, César García, Julio Villanueva, Aarón Téllez, Emiliano Torres, Felipe de Jesús, y a todos aquellos con quienes disfrute mi estancia como estudiante.

## ÍNDICE GENERAL

|   |           |
|---|-----------|
| Índice de Figuras e Imágenes .....  | vi        |
| Índice de Tablas .....  | viii      |
| Resumen .....   | viii      |
| Introducción .....  | ix        |
| Abstract .....  | x         |
| <b>Capítulo I. Descripción de actividades .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Misión y visión de la empresa .....  | 1         |
| 1.2. Descripción de actividades profesionales .....   | 2         |
| <b>Capítulo II. Marco Conceptual .....</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1. Clasificación de crudos .....  | 4         |
| 2.1.1. Clasificación de crudos según su composición .....   | 5         |
| 2.1.2. Clasificación de crudos según su densidad relativa API .....                               | 6         |
| 2.2. Composición química del petróleo .....   | 8         |
| 2.2.1. Saturados .....  | 8         |
| 2.2.2. Aromáticos .....   | 9         |
| 2.2.3. Resinas y Asfaltenos .....   | 11        |
| 2.2.3.1 Modelos del comportamiento de los Asfaltenos en el Crudo .....                            | 12        |
| 2.3. Estabilidad y Compatibilidad de Crudos .....   | 18        |
| 2.4. La inestabilidad e incompatibilidad de Crudos como problemas en la industria petrolera ..... | 19        |
| 2.4.1. Definición del problema y Justificación del caso .....                                     | 21        |
| <b>Capítulo III. Metodología .....</b>  | <b>22</b> |
| 3.1. Prueba de la Mancha (ASTM D-4740) .....  | 24        |
| 3.1.1. Equipo de laboratorio .....  | 24        |
| 3.1.2. Procedimiento .....  | 26        |
| 3.1.3. Interpretación de Resultados .....   | 28        |
| 3.2. Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan (ASTM D-7061) .....                              | 29        |
| 3.2.1. Equipo de laboratorio .....  | 29        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.2. Procedimiento .....   | 31        |
| 3.2.3. Interpretación de Resultados .....                            | 32        |
| 3.3. Prueba de Estabilidad en columna Estática .....                 | 34        |
| 3.3.1. Equipo de laboratorio .....                                   | 34        |
| 3.3.2. Procedimiento .....   | 35        |
| 3.3.3. Interpretación de Resultados .....                            | 36        |
| <b>Capítulo IV. Resultados y Recomendaciones .....</b>               | <b>37</b> |
| 4.1. Prueba de la Mancha (ASTM D-4740) .....                         | 37        |
| 4.2. Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan (ASTM D-7061) ..... | 41        |
| 4.3. Prueba de Estabilidad en Columna Estática .....                 | 42        |
| 4.4 Identificación del problema .....                                | 43        |
| <b>Conclusión.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>Recomendaciones.....</b>  | <b>46</b> |
| <b>Referencias .....</b>   | <b>47</b> |
| <b>Bibliografía de las Tablas, Figuras e Imágenes. ....</b>          | <b>50</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS E IMÁGENES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama del Flujo de Trabajo .....  | 12 |
| Figura 2. Hidrómetro .....   | 15 |
| Figura 3. Ejemplos de moléculas de Saturados .....   | 17 |
| Figura 4. Dos formas diferentes de la resonancia del benceno. ....   | 18 |
| Figura 5. Compuestos representativos de los Hidrocarburos aromáticos. ....   | 19 |
| Figura 6. Ejemplo de la molécula de Resina .....   | 20 |
| Figura 7. Ejemplo de moléculas de Asfaltenos. ....   | 21 |
| Figura 8. Esquema representativo de una molécula polar de resina. ....   | 23 |
| Figura 9. Esquema representativo de un sistema micelar resina-asfalteno. ....  | 24 |
| Figura 10. Proceso de precipitación de moléculas de asfaltenos. ....   | 26 |
| Figura 11. Esquema representativo de la distribución de Corrientes y Mezclas que llegan a Terminal. ....                               | 32 |
| Figura 12. Soporte de papel de Prueba. ....  | 34 |
| Figura 13. Transmitancia y Reflectividad de parafinas y asfaltenos. ....   | 42 |
| Imagen 1 Taponamiento de asfaltenos en tubería. ....   | 28 |
| Imagen 2. Puerquito limpiador con cepillos circulares, .....   | 29 |
| Imagen 3. Resultados Prueba de la Mancha a las Corrientes de crudos pesados y ligeros. ....  | 49 |
| Imagen 4. Prueba de la Mancha a las Corrientes y las Mezclas de crudos pesados y ligeros y la Mezcla de C. Pesados + C. Ligeros" ..... | 50 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Clasificación de crudos según su densidad relativa API. ....                      | 17 |
| Tabla 2. Manchas de referencia. ....   | 36 |
| Tabla 3. Valor de estabilidad. ....  | 43 |
| Tabla 4. Caracterización de las Corrientes .....   | 47 |
| Tabla 5. Número de Separabilidad (S) de Aceites Crudos. ....                               | 51 |
| Tabla 6. Propiedades Antes y después de la Prueba de Estabilidad en Columna Estática. .... | 53 |
| Tabla 7. Resultados de las pruebas de laboratorio. ....                                    | 52 |

## RESUMEN

Se presenta en este informe la planeación y desarrollo de un proyecto para el estudio de compatibilidad y estabilidad de crudos que permita la solución de un problema ingenieril en el ámbito profesional.

En la Descripción de Actividades se describe la planeación, selección y aplicación de actividades requeridas para el estudio, así como sus justificaciones y mi participación en estas.

El Marco Conceptual conjunta los conceptos clave de la literatura relacionados al tema. En este apartado se describen los distintos criterios que se usan a nivel mundial para la clasificación en cuanto a la química composicional de los petróleos crudos, principalmente a la caracterización de los grupos moleculares afines en polaridad y solubilidad (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos). Se definen conceptos de estabilidad y compatibilidad y se analiza el comportamiento de los crudos a nivel molecular en cada uno de ellos.

En la Metodología se describen los experimentos Prueba de la Mancha, Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan, y la Prueba de Estabilidad en Columna Estática; el equipo de laboratorio, procedimiento y la interpretación de sus resultados.

El último apartado (Resultados y Recomendaciones) se presentan como conjunto los resultados de todas las pruebas de laboratorio, la identificación del problema, su justificación y la propuesta final para la solución del problema.

## INTRODUCCIÓN

El petróleo crudo es una mezcla compleja de hidrocarburos de formas y tamaños diferentes con grupos funcionales de átomos (N, S, O y metales). Es la fuente energética más importante para el país. Su importancia en la actualidad, obliga a realizar estudios para conocer de manera más profunda la composición, estructura y comportamiento de crudos y sus mezclas durante su transporte y almacenamiento.

En el caso de mezclas entre aceites crudos, aun cuando se trata de materiales de naturaleza similar y en apariencia compatibles (miscibles), las diferencias en su composición química pueden provocar cambios notables en su estabilidad, que puede también afectarse por las condiciones de temperatura y presión a las que se exponen (Roque Guzmán, 2017).

Los análisis de compatibilidad y estabilidad son pruebas de laboratorio que nos emulan el comportamiento molecular de mezclas y corrientes de crudos durante su almacenamiento y transporte.

Los problemas relacionados con la inestabilidad e incompatibilidad de los componentes del petróleo crudo están presentes en toda la cadena de producción, comenzando en el pozo donde pueden reducir la recuperación de petróleo a través de cambios en la mojabilidad del yacimiento, la obstrucción de los poros de la roca, y la deposición de los asfaltenos en los pozos, la formación y el fortalecimiento de las emulsiones de aceite-agua. Así mismo, la refinación de crudos pesados en operaciones aguas abajo es muy difícil, ya que puede conducir a la coquización, ensuciamiento y desactivación del catalizador durante el procesamiento o mejoramiento, ya que se requieren temperaturas altas y condiciones de vacío (Lamina Goual, 2012).

## ABSTRACT

Crude oil is a complex mixture of hydrocarbons of different shapes and sizes with functional groups of atoms (N, S, O and metals). It is the most important source of energy for the country. Its importance at present, forces to realize studies to know more closely the composition, the structure and the behavior of the crudes and the mixtures during its transport and storage.

In the case of mixtures between crude oils, even in the case of materials of similar nature and apparently compatible (miscible), the differences in their chemical composition can cause significant changes in their stability, which can also be affected by the temperature and pressure conditions to which they are exposed (Roque Guzmán, 2017).

The analysis of compatibility and stability are laboratory test that are based on the molecular behavior of crude mixtures and streams during storage and transport.

Complications related to the instability and incompatibility of petroleum elements are present throughout the production chain, starting at the well where oil recovery can be obtained through changes in reservoir wettability, obstruction of oil rock pores, the deposition of asphaltenes in wells, and the formation and strengthening of oil-water emulsions. Likewise, the refining of heavy crudes in water operations is very difficult; it can already lead to coking, fouling and deactivation of the catalyst during processing or improvement, since high speeds and vacuum conditions are required (Lamina Goual, 2012).

## CAPÍTULO I.

### DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

Petróleos Mexicanos (PEMEX) es una empresa estatal productora, transportista, refinadora y comercializadora de petróleo y gas natural de México. Cuenta con un régimen individual constitucional denominado Empresa Productiva del Estado para la explotación de los recursos energéticos en territorio mexicano, aunque también cuenta con diversas operaciones en el extranjero, principalmente de comercialización, operaciones financieras y servicios petroleros periféricos (Petróleos Mexicanos, 2018)

Posterior a la Reforma Energética, Pemex Exploración y Producción (PEP), se transformó en una empresa productiva del Estado subsidiaria de Petróleos Mexicanos, con personalidad jurídica y patrimonio propios, sujeta a la conducción central, dirección estratégica y coordinación de Petróleos Mexicanos, de conformidad con lo establecido en la Ley de Petróleos Mexicanos y su Reglamento, que tiene como finalidad generar valor económico y rentabilidad para el Estado Mexicano (Diario Oficial de la Federación, 2017).

#### **1.1 Misión y visión de la empresa**

PEP tiene la responsabilidad de realizar sus actividades en beneficio de la nación y conforme a los más altos niveles de competitividad Internacional, esto supone un profundo compromiso que se expresa en su misión y visión.

La Misión de PEP es maximizar el valor económico a largo plazo de las reservas de crudo y gas natural del país, garantizando la seguridad de nuestras instalaciones y de nuestro personal; en armonía con la comunidad y el medio ambiente.

La Visión de PEP es ser reconocida como la mejor inversión de los mexicanos, como una empresa líder de exploración y producción en el ámbito internacional, comprometida con el desarrollo integral de su personal y con los más altos

estándares de eficiencia, ética profesional, protección al medio ambiente y seguridad (PEP, 2018).

## 1.2 Descripción de actividades profesionales

Como profesionista en entrenamiento del programa “*Becarios*” me dieron la oportunidad de coadyuvar en el proyecto: “***Estudios de Compatibilidad y Estabilidad de crudos que se mezclan en Terminal***”. En la **Figura 1** se muestra un diagrama con las etapas del proyecto y mi asistencia en estas.

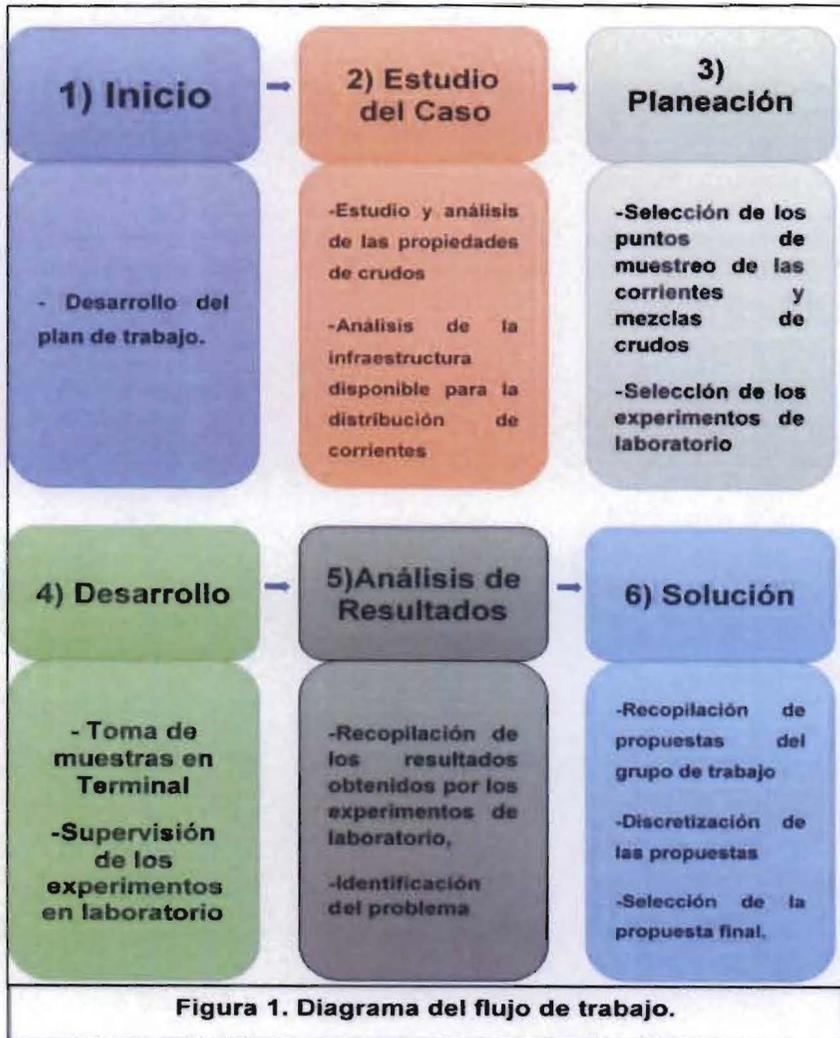
El proyecto se desarrolló básicamente en seis fases. El equipo realizó las actividades de manera individual y grupal con sesiones semanales donde argumentábamos acerca del tema.

Al inicio, se dio a conocer el problema, se estableció el objetivo y se elaboraron diferentes planes de trabajo con escenarios de probabilidades altas, medias y bajas. El tiempo requerido para realizar las actividades se fundamentó en el escenario de probabilidades altas, aunque, el esfuerzo arduo de todos permitió alcanzar el objetivo antes del escenario con probabilidades bajas. Se prosiguió al estudio del caso donde otras áreas nos apoyaron con la caracterización de los crudos, información de la infraestructura de transporte y distribución de PEMEX, las condiciones de presión, gasto, temperatura de cada corriente, los estándares de calidad, los métodos para tratar el crudo, entre otros, que posteriormente analizamos, entendimos y dominamos.

En la planeación, con el conocimiento adquirido se establecieron puntos estratégicos de muestreo y los experimentos de laboratorio siguientes a realizar. En el desarrollo, el equipo de trabajo se dispersó, algunos fueron a tomar las muestras y después la otra parte supervisó los experimentos de laboratorio (Yo participe en la supervisión de los experimentos de laboratorio).

Los resultados se recibieron por etapas. Mientras esperábamos que llegaran todos, estudiábamos los entregados de manera individual. Para identificar la raíz del problema fue necesario relacionarlos todos.

Con los resultados de laboratorio se analizaron los fenómenos que emularon los experimentos para llevar ese comportamiento a los crudos en la terminal. Después de algunas reuniones se identificó el problema, cada integrante propuso una solución y se eligió la que podría resolver el problema en menor tiempo y a un costo económico bajo.



## CAPÍTULO II.

### MARCO CONCEPTUAL

El petróleo es una mezcla compleja principalmente de hidrocarburos que varían en forma y tamaño con grupos funcionales de heteroátomos (nitrógeno, oxígeno, azufre, y metales) que se adhieren en sus estructuras. Las características de las moléculas que conforman un crudo varían según el tipo de querógeno y las condiciones de presión y temperatura de la roca madre y el yacimiento productor.

Para su comercialización existen muchos factores como la oferta y demanda, factores geopolíticos, economía mundial, fondos de inversión, competitividad y calidad, que determinan su precio (EIA, 2016). No obstante, en la actualidad los aspectos económicos y políticos tienen mayor peso en la toma de decisiones para su compra y venta. Las mejores compañías tienden a sacar provecho de dicha situación y por esto, es fundamental conocer la calidad composicional de nuestra mercancía, para competir de manera inteligente y audaz en el mercado energético internacional.

Debido a la variedad de hidrocarburos, la caracterización de las moléculas a nivel individual es una tarea compleja y para distinguirlos existen clasificaciones por grupos químicos afines. Existen compañías como el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute, API) y la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), que han desarrollado normas para el desarrollo de métodos experimentales que evalúan sus propiedades y composición.

#### **2.1 Clasificación de Crudos**

Debido a la diversidad de elementos del petróleo crudo, existen diferentes maneras de clasificarlo. Para obtener los rendimientos de los derivados (gasolina, turbosina, coque, diesel, etc.) y diseñar los procesos de refinación, es necesario distinguirlos por su base. Sin embargo, la industria mundial de hidrocarburos

líquidos clasifica el petróleo de acuerdo con su densidad API (parámetro internacional del Instituto Americano del Petróleo, que diferencia las calidades del crudo) (Castanedo). Otras clasificaciones no menos importantes son: por el tipo de yacimiento, método de producción y contenido de azufre.

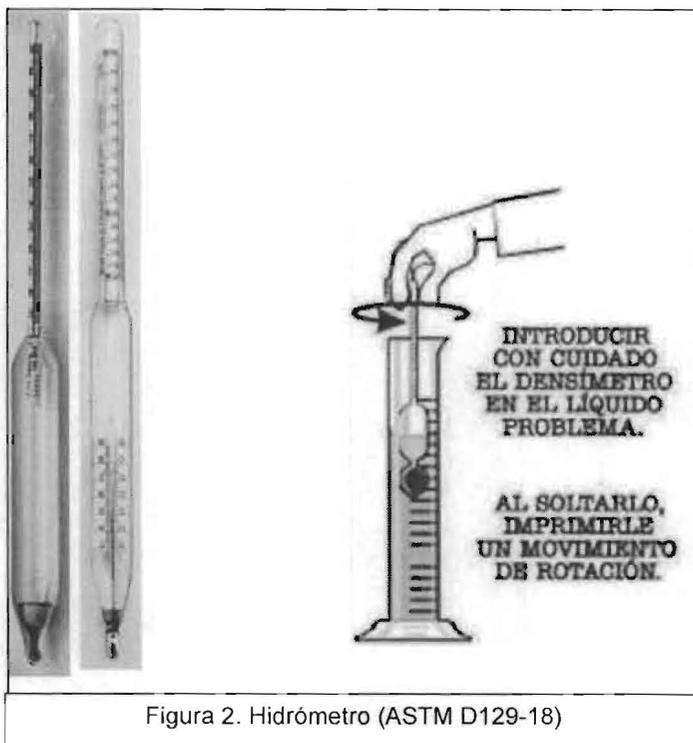
### 2.1.1 Clasificación de crudos según su composición.

En esta clasificación los crudos se definen por el componente molecular que predomina en su composición y/o componente base.

- **Crudos de base parafínica:** son crudos cuyos componentes mayoritarios son hidrocarburos con enlaces covalentes sencillos (parafinas), pueden ser cadenas lineales o ramificadas. Los asfáltenos se encuentran suspendidos en menor cantidad.
- **Crudos de base asfáltica o nafténicos:** son crudos cuyos componentes mayoritarios son estructuras cíclicas de enlaces sencillos (naftenos), aunque pueden tener anillos aromáticos y parafinas en menores cantidades.
- **Crudos aromáticos:** son crudos que contiene cantidades importantes de compuestos aromáticos mono o policíclicos, que pueden sustituirse con anillos nafténicos y/o cadenas laterales parafínicas.
- **Crudos base mixta:** son crudos donde existe una concentración equitativa de dos o más compuestos, usualmente aromáticos y parafinas.

### 2.1.2 Clasificación de los crudos según su densidad relativa API:

El API desarrolló una escala para medir la densidad relativa de diversos líquidos del petróleo, expresada en grados. El hidrómetro (Figura 2) es el instrumento de medición y está graduado de manera tal que el rango de valores es de  $10^{\circ}$  a  $70^{\circ}$ .<sup>(6)</sup> Para medir la densidad API, se sumerge en el líquido de interés. El contrapeso de mercurio en su parte inferior hunde cierta porción del hidrómetro y el menisco del fluido indica en la graduación del instrumento la densidad API correspondiente. El hidrómetro se calibra previamente con agua para que al sumergirlo marque los  $10^{\circ}$  API.



La Ecuación 2.1 es la fórmula utilizada para obtener la densidad API de fluidos.

$$\text{Gravedad API} = \frac{141.5}{\delta} - 131.5 \text{ [}^\circ\text{API]} @60^\circ\text{f}, \quad \dots\dots\dots 2.1$$

donde:

$\delta$ : Gravedad específica del fluido.

Los crudos se clasifican como ligeros, medios o pesados como se muestra en la **Tabla 1**.

| Tabla 1. Clasificación de los crudos según su densidad API (Melvin, 2016). |             |                               |  |
|--|-------------|-------------------------------|--|
| Crudo  | Escala API  | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Descripción  |
| Liviano  | 30 – 40     | 0.87 – 0.83                   | transporte y extracción fácil, excelente para refinar en combustibles y derivados.   |
| Mediano  | 22 – 29.9   | 0.92 – 0.87                   | transporte y extracción fácil, bueno para combustibles y derivados.  |
| Pesado   | 10 – 21.9   | 1.00 – 0.92                   | transporte fácil y difícil extracción, requiere procesos de conversión media y profunda para obtener combustibles derivados. |
| Extrapesado  | Menos de 10 | >1.00                         | transporte y extracción difíciles, requiere procesos de conversión profunda.   |

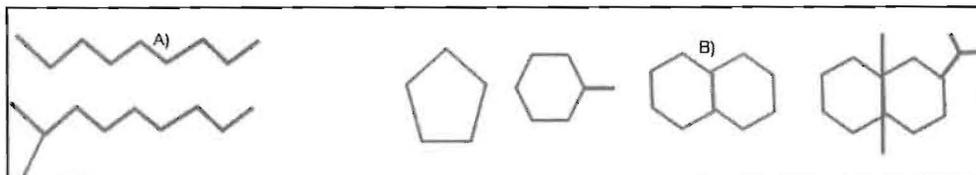
## 2.2 Composición química del petróleo

El petróleo está constituido por cuatro familias químicas definidas principalmente por su polaridad y solubilidad: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos (SARA). (Speight, 1984)

**2.2.1 Saturados:** crudos con carbonos unidos por enlaces covalentes sencillos; pueden ser estructuras acíclicas (sin anillos) como las parafinas o cíclicas como los naftenos. Las parafinas pueden ser lineales o ramificadas, es decir, la unión de dos o más carbonos. Los naftenos, también conocidos como cicloparafinas, tienen uno o más anillos, principalmente de 6 átomos de carbono, enlazados normalmente con cadenas alquílicas.

La gravedad específica es una propiedad inversamente proporcional a la concentración de saturados en los crudos. Los petróleos ligeros son base parafínica; en cambio, los crudos pesados cuentan con pequeñas concentraciones, como se explica el apartado 2.1.1.

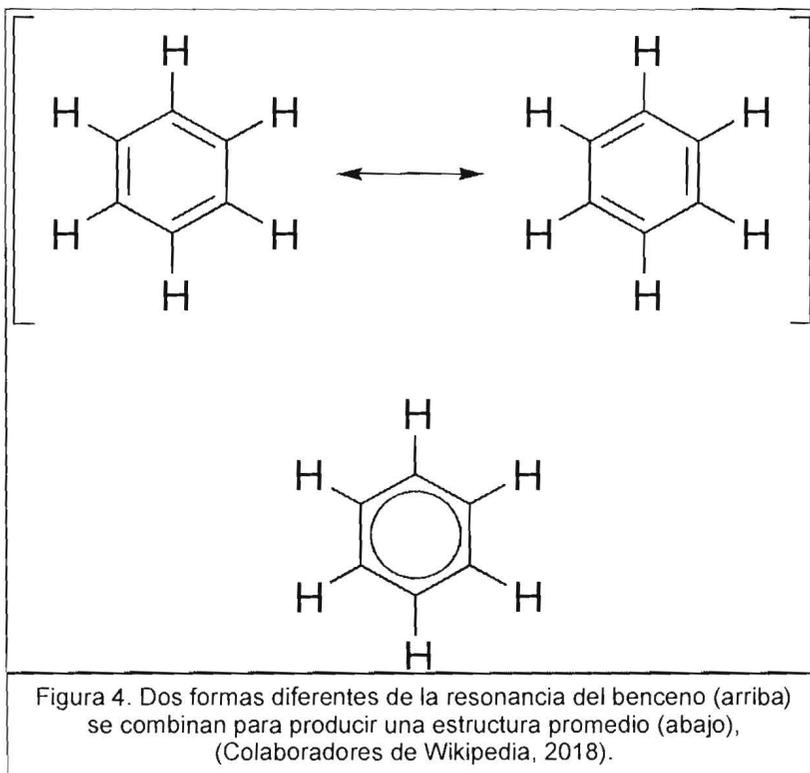
Algunos ejemplos de moléculas saturadas se presentan en la **Figura 3**.



**Figura 3. Ejemplos de moléculas de saturados**  
A) n- e iso-parafinas B) cicloparafinas

**2.2.2 Aromáticos:** son compuestos cíclicos o policíclicos orgánicos que tienen como base la estructura química del benceno, seis carbonos unidos en forma hexagonal con enlaces alternados simples y dobles. Una de las propiedades más importantes de los hidrocarburos aromáticos es la sustitución de hidrógeno del núcleo bencénico por grupos funcionales (NO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>H, halógenos, etc).

El Círculo o anillo que se coloca dentro de los hidrocarburos aromáticos (Figura 4) indica que los pares de electrones se encuentran en movimiento constante con el objeto de mantener la estabilidad del compuesto (Timberlake, 2013).



Los hidrocarburos Aromáticos se utilizan para diversas tareas comerciales, como la síntesis química de plásticos, caucho sintético, pinturas, pigmentos, explosivos, pesticidas, detergentes, perfumes y muchos fármacos, también se usa como conservante de alimentos, además de usarse como constituyente de la gasolina.

En la **Figura 5** se muestran los compuestos más representativos de los hidrocarburos aromáticos: Benceno, Xileno, Tolueno y Naftaleno.

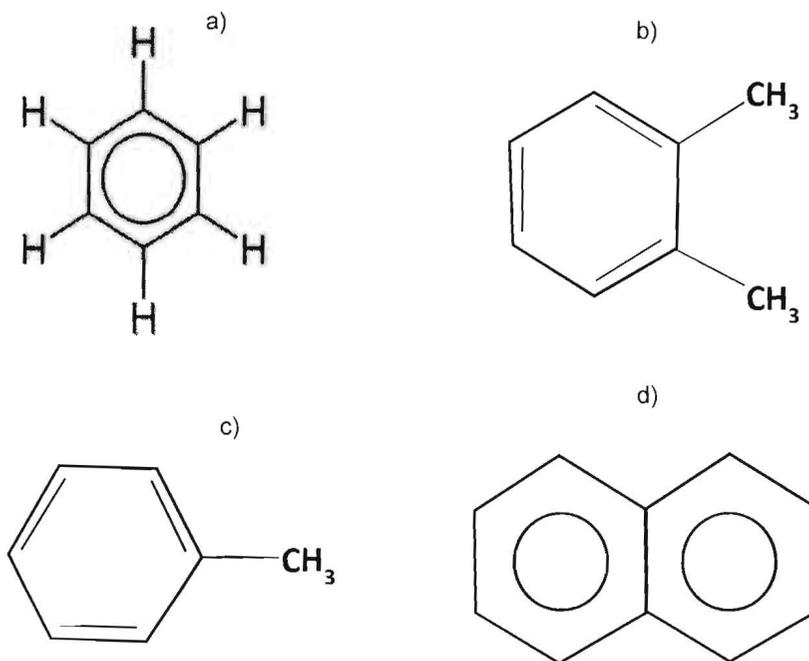


Figura 5. Compuestos representativos de los Hidrocarburos aromáticos.  
a) Benceno, b) Xileno, d) Tolueno, e) Naftalen, (Modificado de Colaboradores de Wikipedia, 2018).

**2.2.3 Resinas y Asfaltenos:** ambos compuestos están formados por una mezcla compleja de elementos nafténicos y aromáticos, enlazados con grupo funcionales que contienen nitrógeno, azufre, oxígeno y metales de formación.

La naturaleza de las resinas y los asfaltenos es impredecible y no se puede establecer un número específico de sus elementos para distinguirlos. Sin embargo, las resinas cuentan con mayor concentración de componentes saturados (naftenos), que los vuelven solubles en parafinas. Los asfaltenos son estructuras más grandes, base aromática e insolubles en parafinas, con grandes cantidades de nitrógeno, azufre, oxígeno y metales de formación.

Algunos científicos consideran a las resinas como un producto intermedio originado en la transformación del crudo en asfaltenos, proceso que ocurre tanto por oxidación aérea como por tratamiento directo con oxígeno y azufre (M. Alayon, 2004).

En las **Figuras 6 y 7** se muestran un ejemplo molecular de resinas y asfaltenos, respectivamente.

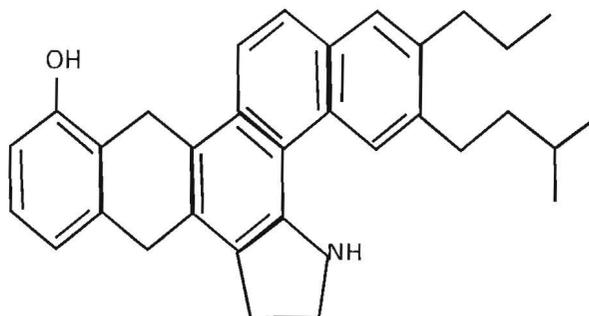


Figura 6. Ejemplo de molécula de Resina

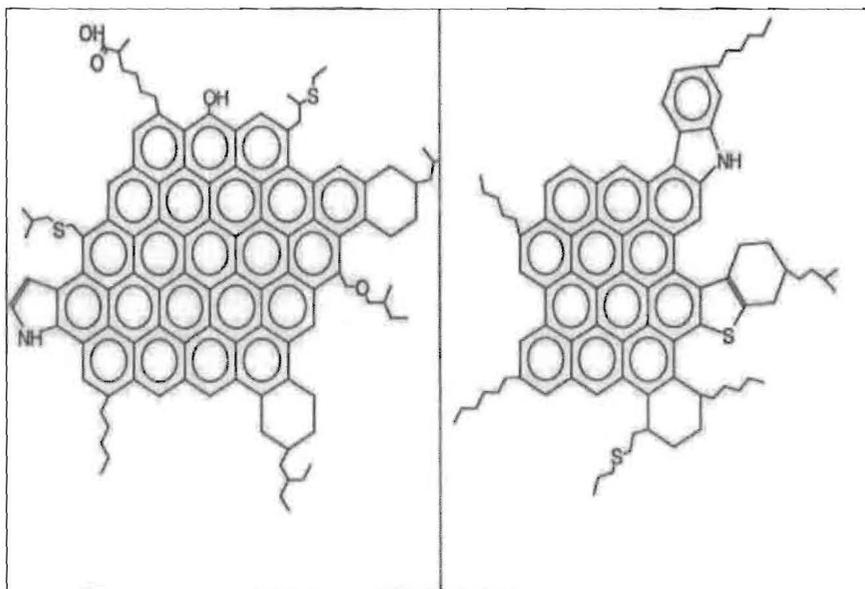


Figura 7. Ejemplos de moléculas de Asfaltenos, (Castro G., M.; Macías C., 2004)

### 2.2.3.1 Modelos del comportamiento de los Asfaltenos en el crudo.

Los asfaltenos son los compuestos más inestables de los petróleos crudos; pueden existir en diferentes fases y contienen la mayoría de los heteroátomos y metales del crudo, lo que les brinda su polaridad. A través de los años se han desarrollado un sinnúmero de experimentos que han permitido a los científicos desarrollar modelos que recreen su comportamiento. El Modelo Coloidal y el Modelo Molecular Termodinámico se consideran en la literatura como los de mayor exactitud.

Para llevar al lector al entendimiento del comportamiento de los asfaltenos mediante estos modelos, se definirán a continuación algunos conceptos.

- a) Coloide: en física y química un coloide, sistema coloidal, suspensión coloidal o dispersión coloidal, es un sistema conformado por dos o más fases, normalmente una fluida (líquido) y otra dispersa en forma de partículas generalmente sólidas muy finas, de diámetro comprendido entre  $10^{-9}$  y  $10^{-5}$  m (Doménech y Peral, 2010).
- b) Micela: se denomina micela al conjunto de moléculas que constituye una de las fases de los coloides (Wikipedia, 2018).
- c) Precipitación: es un proceso en el que se obtiene un sólido a partir de una disolución. Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente. El sólido así obtenido se denomina precipitado y puede englobar impurezas (Universidad de Barcelona, 2016).
- d) Floculación: se refiere a la agregación de sólidos suspendidos en masas visiblemente más grandes, que pueden o no asentarse o precipitar.
- e) Peptización: es el estado esparcido de un sólido en un líquido, en forma de dispersión coloidal (ASTM D7060, 2012).

### a. Modelo Coloidal

Este modelo estipula que los asfaltenos se encuentran solubles en las parafinas por su formación de micelas con las resinas.

La composición química de las resinas le confieren la virtud de ser solubles con las parafinas (no polares) por su cantidad considerable de saturados y, además, ser polares por sus fracciones menores aromáticas con grupos funcionales de heteroátomos, como se muestra en la Figura 8.

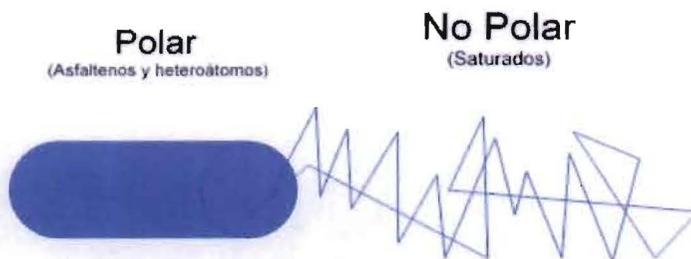
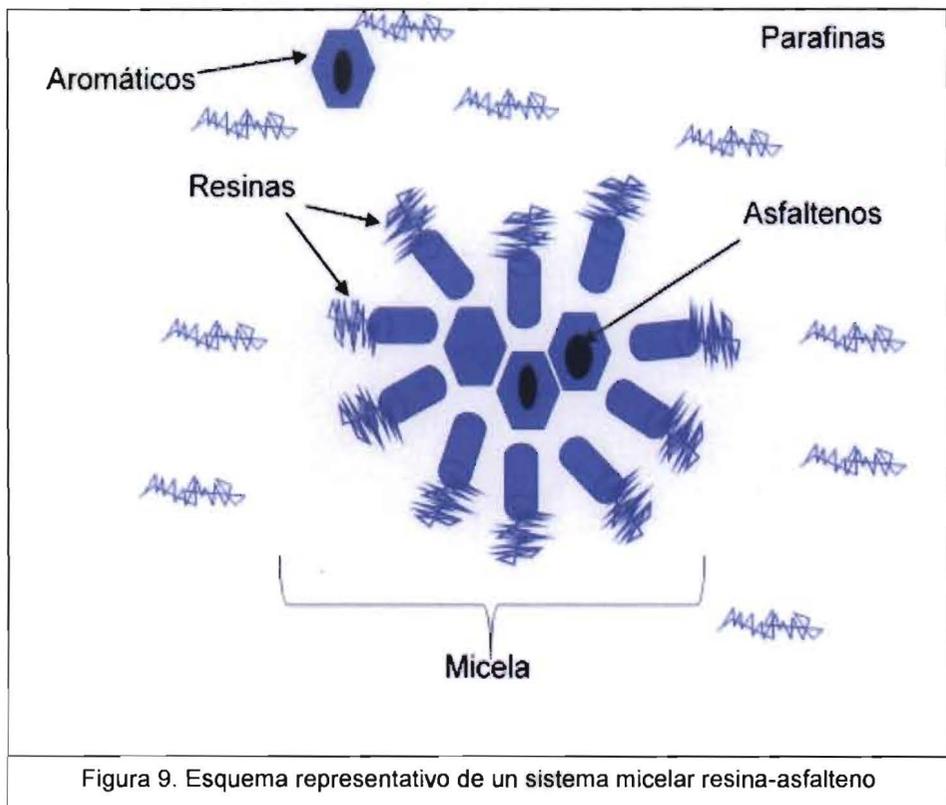


Figura 8. Esquema representativo de una molécula de Resina, (modificado de M. Alayon, 2004).

Cuando los extremos polares de las resinas recubren (rodean) a los asfaltenos, forman una micela. Dicha estructura genera una interfase entre los asfaltenos y el resto de la matriz del crudo (parafinas y fracciones aromáticos). De esta manera los asfaltenos pueden coexistir como agregados coloidales solubles en el crudo.

Koats y Speight (1975) separaron varios crudos en asfaltenos, resinas y fracción "petróleo". Encontraron que la fracción asfalteno no puede

solubilizarse (dispersarse en realidad) en ausencia de las resinas, que además es selectiva al crudo de que proviene. La resina sería al petróleo un cosolvente de los asfáltenos. Las resinas pueden ser cosolventes efectivos solamente para los asfáltenos del mismo crudo debido a que las fuerzas geológicas bajo las cuales se formaron han ejercido similar influencia sobre la funcionalidad de resinas y asfáltenos vía uniones hidrogeno (Speight, 1991), como se muestra en la **Figura 9**.



## b. Modelo Molecular Termodinámico

El Modelo Molecular Termodinámico (MMT) tiene como principio la reconfiguración de las estructuras moleculares en una sustancia para lograr el equilibrio energético y/o termodinámico.

En el crudo este modelo conceptualiza la transferencia de resinas entre los asfaltenos y la matriz del crudo como respuesta a cambios drásticos de temperatura, presión, flujo o composición. Las resinas pueden estar libres o coexistir con los asfaltenos en forma micelar. Los asfaltenos pueden estar peptizados, floculados o precipitados.

El proceso de precipitación de los asfaltenos es un claro ejemplo del MMT (**Figura 10**).

Un crudo estable tiene a los asfaltenos en estado peptizado (Figura 10, inciso A). Cuando las condiciones de presión y temperatura cambian drásticamente, las resinas se transfieren de los asfaltenos a la matriz del crudo y se distribuyen para alcanzar nuevamente el equilibrio (Figura 10, inciso B). Los asfaltenos, al ser compuestos polares, se atraen y floculan (Figura 10, inciso C).

Cuando la floculación de varios elementos de asfaltenos alcanza un peso molecular grande precipitan (Figura 10, inciso D).

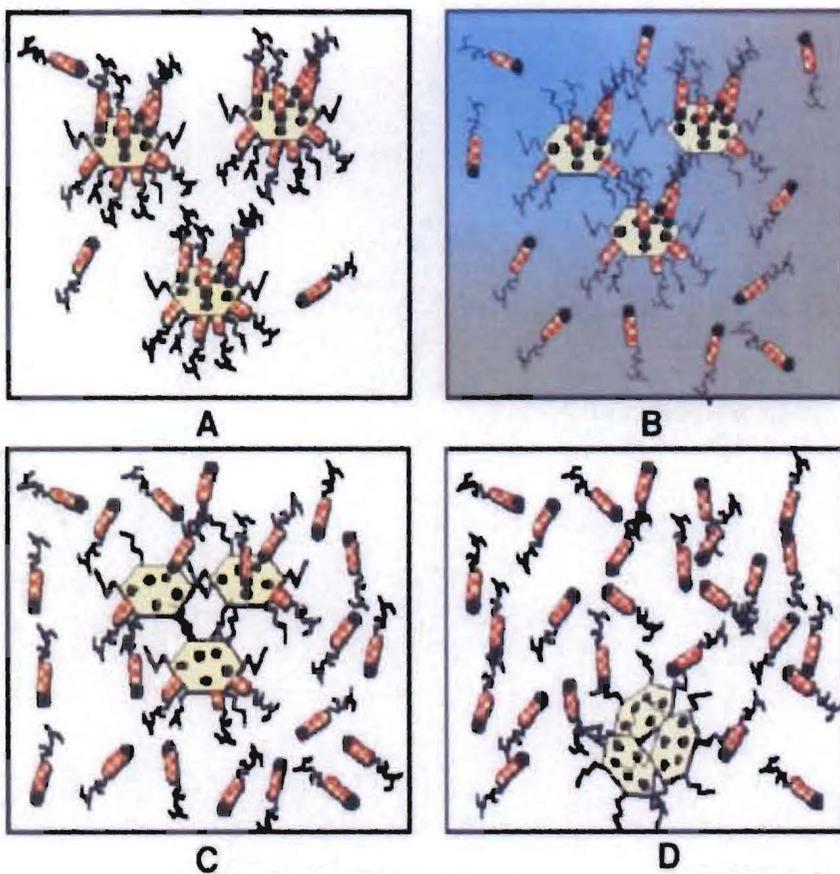


Figura 10. Precipitación de las moléculas de los asfaltenos.  
 A) Sistema micelar resina-asfalteno, B) transferencia de las resinas a la matriz del crudo, C) Floculación y D) precipitación, (M. Alayon, 2004).

### 2.3 Estabilidad y Compatibilidad de Crudos

En el caso de crudos y sus mezclas, la estabilidad y compatibilidad son fenómenos que se relacionan, asociados con la interacción entre parafinas, resinas y asfaltenos. En la literatura ambos conceptos se focalizan a la precipitación de asfaltenos, pero también, pueden relacionarse con los otros componentes hidrocarburos (parafinas, naftenos, resinas y aromáticos).

En química se utiliza el concepto estabilidad para un crudo singular o un fluido, y a la compatibilidad a la mezcla de dos o más crudos o fluidos. Sin embargo, en la práctica profesional el concepto de estabilidad puede utilizarse para una mezcla y un crudo, ya que también ambos (singular o plural) son multicomponentes.

Un crudo es estable, cuando los asfaltenos se encuentran suspendidos y distribuidos de forma isótropa en la fase continua e inestable, cuando estos floculan o precipitan.

Para las mezclas la estabilidad puede interpretarse de dos maneras:

1. Una mezcla de crudos es estable cuando sus elementos son afines y le permite tener a los asfaltenos solubles en su matriz. En este caso la definición de estabilidad es la misma que la de un solo crudo.
2. Una mezcla de crudos es estable cuando sus elementos permanecen estáticos o invariables a través del tiempo durante su almacenamiento.

Una mezcla de crudos es compatible, cuando sus componentes se pueden mezclar de forma isótropa sin evidenciar precipitación alguna e incompatible, cuando sus componentes no pueden disgregarse y/o distribuirse de manera homogénea. Los crudos de base similar usualmente son compatibles por la similitud composicional de elementos ligeros o pesados. Los crudos de base distinta presentan incompatibilidad; por ejemplo, cuando un crudo base parafínica se mezcla con uno base asfáltica o aromática.

## 2.4 La inestabilidad e incompatibilidad como problemas en la industria petrolera

Un crudo inestable o una mezcla incompatible evidenciará precipitación de asfaltenos, heterogeneidad final de la mezcla, problemas operativos, entre otros.

En cuanto a los asfaltenos, estos se encuentran presentes en todos los crudos, en concentraciones mayores o menores dependiendo de su origen. El problema principal, contrario a las parafinas, es su proceso irreversible de precipitación. Cuando los asfaltenos precipitan, forman sólidos que se adhieren a las superficies de la roca en el yacimiento, los tanques de almacenamiento, tuberías, torres de destilación, entre otros y es imposible solubilizarlos nuevamente. Al pasar el tiempo los sólidos precipitados pueden incrementar su tamaño; taponando tuberías (**Figura 11**), originando separación de las fases en tanques de almacenamiento y obstruir el flujo en los yacimientos de crudos extrapesados.



Figura 11. Taponamiento de asfaltenos en tuberías

Existen métodos mecánicos y térmicos que se utilizan en la industria para eliminar las depositaciones. En líneas de producción se insertan puerquitos (pigs) con escareadores que raspan la superficie interna de la tubería (**Figura 12**). En Venezuela, los yacimientos de crudos extrapesados utilizan métodos térmicos de recuperación mejorada, como el método de combustión in-situ, donde se genera la combustión dentro del yacimiento para romper la estructura de los asfaltenos y reducir la viscosidad del crudo.



Figura 12. Puerquito limpiador con cepillos circulares.

## 2.4.1 Definición del problema y justificación del caso de estudio.

### a) Definición del problema

En la terminal se desarrollan los procesos de deshidratación y desalado. Para extraer el exceso de sal, los ingenieros saturan la mezcla con agua salada para alcanzar el punto crítico de solubilidad e inducir su precipitación. Un ejemplo claro es cuando tenemos un soluto (sal) en una solución (agua). El soluto puede estar disuelto en concentraciones pequeñas a condiciones establecidas. Si continuamos agregando pequeñas cantidades de soluto, este puede seguir disuelto hasta que se alcanza un punto crítico, donde la solución no puede solubilizarlo más y precipita. En cuanto a la deshidratación el agua y el aceite se separan por su diferencia de densidades y por segregación gravitacional.

Una mezcla heterogénea impide a los procesos de deshidratación y desalado lograr sus objetivos. Por ejemplo, los cálculos ingenieriles para determinar la cantidad de iones que permita precipitar las sales no obtienen resultados eficaces, ya que se encuentran dispersas en concentraciones diferentes, o el tiempo para la separación de agua y aceite es mayor al establecido.

### a) Justificación

Para la comercialización de crudos se elaboran y firman contratos donde se establecen especificaciones que se deben cumplir (contenido de azufre, gravedad API, contenido de agua y sal, volúmenes, mecanismo de precio, etc). Si no se cumplen las especificaciones se penaliza al vendedor o al comprador. Las penalizaciones pueden ir desde la cancelación del contrato hasta pérdidas económicas.

## CAPÍTULO III.

### METODOLOGÍA

Para el estudio de corrientes de crudos y sus mezclas, el equipo de trabajo tuvo la fortuna de contar con expertos en el área que habían desarrollado con anterioridad estudios de compatibilidad y estabilidad. Ellos propusieron experimentos de laboratorio cuyos resultados fueran útiles para solucionar la heterogeneidad de la mezcla final de las corrientes. Además, otros integrantes y yo indagamos en la literatura para proponer otros experimentos relacionados al tema.

De todos los experimentos propuestos se seleccionaron aquellos que cumplieron con el presupuesto financiero establecido por PEMEX, la confiabilidad y representatividad de los resultados y que estuvieran estandarizados por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés).

La ASTM es una organización internacional científica que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios (ASTM, 2018). Dentro de los servicios que brinda, están los métodos experimentales estandarizados para el estudio de crudos.

La discretización proporcionó que las pruebas siguientes cumplieran con todos los criterios:

- Prueba de la Mancha (ASTM D-4740),
- Número de Separabilidad (S) en Equipo TurbiScan (ASTM D-7061),
- Prueba de Estabilidad en Columna Estática.

Posteriormente, con el conocimiento de la infraestructura que cuenta la Empresa para transportar los crudos, su procedencia y sus volúmenes, se determinaron los puntos estratégicos de muestreo. La Figura 13 es un esquema representativo de la distribución de corrientes y mezclas de crudos seleccionados para desarrollar el estudio de compatibilidad y estabilidad. En total se tomaron 8 muestras, 4 de crudos ligeros de las Corrientes 3, 4, 5 y la Mezcla de Crudos Ligeros; 3 de crudos

pesados de las Corrientes 1, 2 y la Mezcla de Crudos Pesados; y la mezcla final de pesados más ligeros, que es el producto del crudo a exportación.

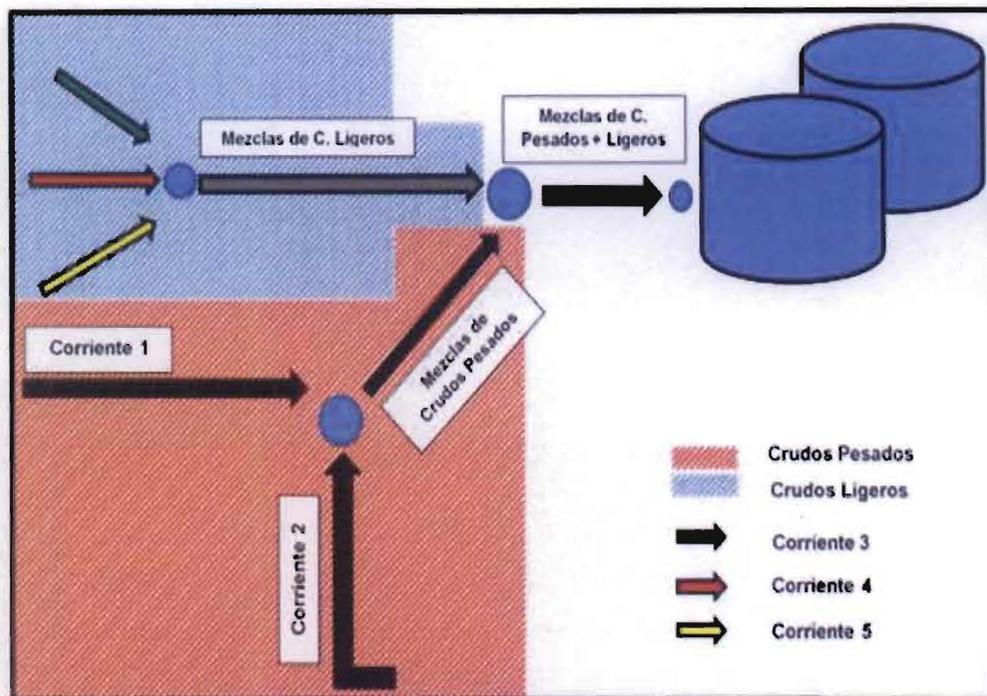


Figura 13. Esquema representativo de la distribución de Corrientes y Mezclas que llegan a la Terminal

### 3.1) Prueba de la Mancha (ASTM D-4740)<sup>(16)</sup>

Este método permite conocer de forma cualitativa la compatibilidad de una mezcla de crudos. Es aplicable a aceites combustibles residuales, con viscosidades mayores a 50 cSt (1cSt = 1mm<sup>2</sup>s) a 100 °C.

Una gota de una mezcla de crudos homogénea y precalentada se vierte sobre *papel de prueba*, posteriormente se introducen al horno a 100 °C. Después de 1 h, se retira del horno y la mancha resultante se examina usando la *Hoja de Manchas de Referencia* adjunta en el Método ASTM D-4740, para determinar la compatibilidad de la mezcla.

#### 3.1.1 Equipo de Laboratorio

- a) *Papel de Prueba* – Papel Cromatográfico cortado o dividido en rectángulos, tiras, o círculos de tamaño apropiado.
- b) *Soporte para el Papel de Prueba* – La **Figura 14** muestra un soporte adecuado para que múltiples muestras se coloquen en el mismo papel.
- c) *Horno* – Cualquier horno de convección capaz de mantener la temperatura del aire a 100 +/- 2 °C.
- d) *Hoja de Manchas de Referencia* – La **Tabla 2** muestra su contenido y describe la forma y características de las manchas resultantes, conforme al grado de incompatibilidad.
- e) *Matraz Cónico* – con capacidad de 100 ml.

- f) *Baño de Calentamiento (Baño María)* – Capaz de calentar una muestra a una temperatura entre 90 y 95°C.
- g) *Termómetro* – Debe contar con la especificación ASTM E1 (Estándar ASTM E1, 2014).

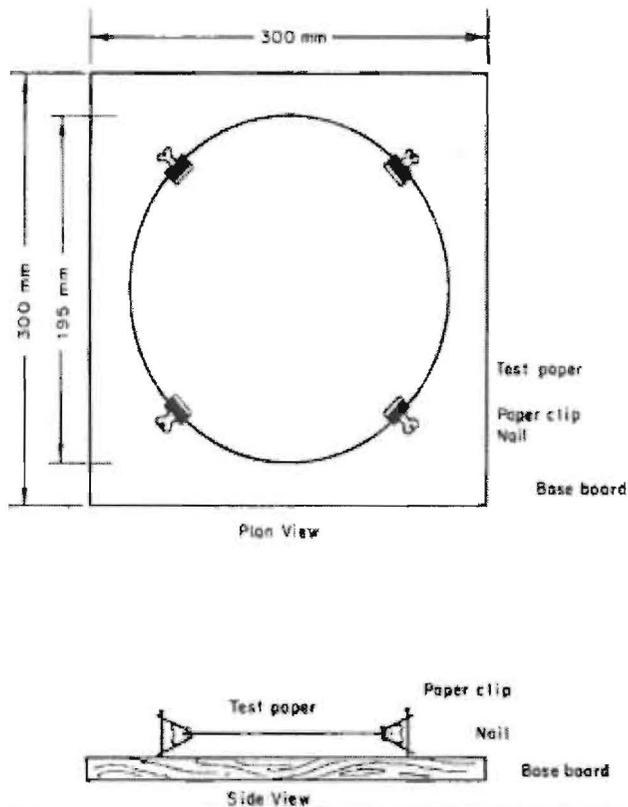


Figura 14. Soporte para Papel de Prueba

| Tabla 2. Descripción de las Manchas de Referencia |  |
|---|--|
| No.   | Características  |
| 1   | Punto homogéneo (sin anillo interno)   |
| 2   | Anillo interno pobremente o débilmente definido  |
| 3   | Anillo interno delgado bien definido, solo ligeramente oscuro que el fondo.                                      |
| 4   | Anillo interno bien definido, más grueso que el anillo de referencia del punto No. 3 y algo oscuro que el fondo. |
| 5   | Área en el centro muy sólido oscuro o casi sólido. El área central es mucho más oscura que base.                 |

### 3.1.2 Procedimiento

- a) Verter 30 ml de cada muestra obtenida en un contenedor apropiado, calentar si fuera necesario.
- b) Preparar la mezcla final.
- c) Verter 50 ml de la mezcla final dentro del matraz cónico y ponerlo en el Baño de Calentamiento.

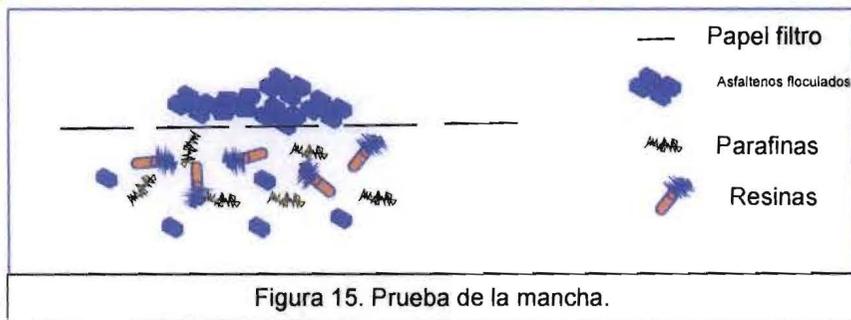
- d) Calentar la mezcla final uniformemente mediante la agitación y mantener a una temperatura entre 90 a 95°C de 15 a 20 min.
- e) Instalar el papel de prueba en su soporte y precalentar en el horno por 5 minutos, permitiendo que la temperatura del papel se equilibre con la del horno. Tener cuidado que los sujetadores del soporte no invadan el área donde se pondrán las gotas.
- f) Precalentar la varilla de vidrio al sumergirla y agitar en la mezcla final por 20 segundos. Retirar la varilla, la primera gota caerá dentro del matraz cónico. La segunda gota se depositará en el papel de prueba precalentado.
- g) Un número de muestras podrán depositarse en el mismo papel de prueba, poner referencias en el papel si es necesario sin que contacten la muestra.
- h) Secar el papel de prueba con las muestras a 100 +/- 2°C en el horno por 1 hr. El papel de muestra deberá mantener un nivel apropiado de manera que prevenga que las muestras entren en contacto con cualquier superficie.
- i) Después de 1 hr, remover el papel de prueba del horno. Comparar las manchas resultantes con las descripciones de la **Tabla 3**. Asignarles un número de incompatibilidad conforme a su similitud.

### 3.1.3 Interpretación de resultados

El papel cromatográfico utilizado en la prueba, actúa como un filtro e impide el desplazamiento de estructuras químicas de gran peso molecular mientras los otros componentes de la gota se esparcen concéntricamente. Aquellas mezclas que presenten incompatibilidad en diferentes grados, presentaran floculación o precipitación de asfaltenos en el centro de la mancha.

El método se usa para identificar mezclas que podrían ocasionar cargas excesivas de centrifugación, taponamiento de filtros, formación de lodos en tanques o problemas operativos similares.

Una mancha asignada con el Numero 3 o mayor se considera incompatible y la causa de los problemas indicados en el punto 5.1 del Método ASTM D-4740.



### 3.2) Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan (ASTM D-7061) <sup>(18)</sup>

Este método mide la facilidad con la cual los asfáltenos contenidos en *aceites combustibles pesados* diluidos en tolueno se separa después de agregar n-heptano. Esto es medido como número de separabilidad (S) por el uso de un instrumento de escaneo óptico.

El método está limitado a aceites combustibles pesados que contienen asfáltenos. La especificación de los aceites combustibles que generalmente se encuentran dentro del campo de aplicación de este método están en la Especificación D-396 <sup>(19)</sup>, Grado Nos. 4, 5, y 6.

El equipo TurbiScan Classic escanea a través de una muestra de aceite combustible diluida en tolueno la separación de fases inducida por n-alcános. Se hace pasar un haz infrarrojo de 850 nanómetros (nm) a través de la muestra mientras se mide la luz transmitida (transmitancia, Xi) por minuto. El tiempo de medición es de 15 minutos.

Al finalizar las 16 mediciones (n) se descartan las de mayor y menor magnitud, considerando el tiempo a los cero segundos. Se calcula el promedio para obtener la transmitancia total ( $X_T$ ) y con uso de la Ecuación 1 del apartado 4.10 del método se obtiene el N° de Separabilidad (S).

#### 3.2.1 Equipo de Laboratorio

- a) *Dos recipientes* – de cristal con tapa, capacidad 100 ml.
- b) *Balanza Electrónica* – con precisión de 0.001 g.
- c) *Agitador Magnético con imanes* – Agitador Magnético “Hot Plate” con base de Politetrafluoroetileno.

- d) *Equipo TurbiScan* – debe cumplir con las especificaciones de la norma ASTM D-7061, Figura 3.
- e) *Pipeta de vidrio* – de 10 ml.
- f) *Tubos de ensayo* – de 10 ml con tapa.



Figura 16. "Equipo TurbiScan"

### 3.2.2 Procedimiento

- a) Con la *Balanza Electrónica* separar 5 gr de aceite combustible en un recipiente.
- b) Diluir tolueno en el aceite combustible en proporción 1:9, verter la mezcla en el *Recipiente*, enroscar la tapa con fuerza y agitar.
- c) Introducir los imanes de agitación a la solución aceite-tolueno, mezclar sobre la *Agitadora Magnética* por 1 hr.
- d) Encender el *Equipo TurbiScan*.
- e) Transferir 23 ml de n-heptano en el otro *Recipiente*. Con una pipeta transferir 2 ml de la mezcla aceite-tolueno al recipiente con n-heptano, tapar y agitar por 6 segundos.
- f) Con la pipeta, extraer 7 ml de la mezcla aceite-tolueno-heptano, verter al *tubo de ensayo* y enroscar la tapa fuertemente.
- g) Insertar el *tubo de ensayo* en el equipo TurbiScan, escanear por 15 min.
- h) Registrar el número de mediciones ( $n$ ) de  $X_i$  del equipo TurbiScan por cada minuto considerando el tiempo a los cero segundos.
- i) Al finalizar, descartar las  $n$  de mayor y menor magnitud y calcular el promedio ( $X_{\bar{}}$ ).

j) Calcular el Número de Separabilidad usando la **Ecuación 3.1**:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_T)^2}{n - 1}} \times 100 [\%], \quad \dots\dots\dots 3.1$$

donde:

$X_i$  = transmitancia cada minuto,

$X_T$  = transmitancia media total,

$S$  = número de separabilidad,

$n$  = número de mediciones.

### 3.2.3 Interpretación de Resultados.

Los asfaltenos presentes en la muestra precipitan con cierta velocidad ocasionando un decremento en la transmitancia (**Figura 17**). Un cambio rápido de la transmitancia implica un número alto de separabilidad.

El criterio del Método ASTM D-7061 para determinar la estabilidad conforme al  $S$  se presenta en la **Tabla 3**. Cuando el número de separabilidad ( $S$ ) se encuentra en el orden del 0 a 5 el petróleo crudo se considera como altamente estable y no existirá precipitación de asfaltenos; entre 5 y 10 la estabilidad del petróleo es medianamente estable y conforme a las condiciones de presión y temperatura existirá o no precipitación de asfaltenos; si  $S$  es superior a 10 la estabilidad del petróleo es baja y sin lugar a duda habrá separación de fases por efecto de gravedad.

| Tabla 3. "Valor de la estabilidad" |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| No. De Separabilidad (S)           | Estabilidad          |
| 0-5                                | Altamente Estable    |
| 5-10                               | Medianamente Estable |
| >10                                | Baja Estabilidad     |

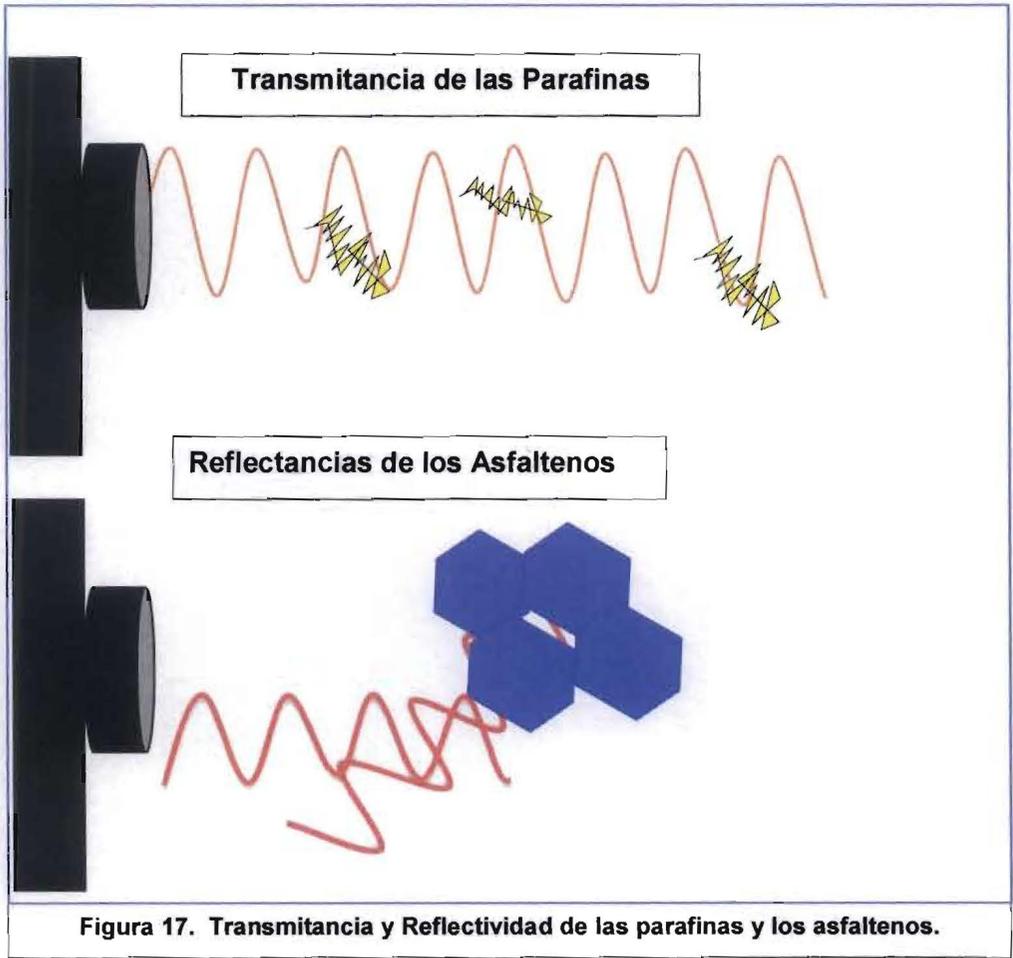


Figura 17. Transmitancia y Reflectividad de las parafinas y los asfaltenos.

### 3.3) Prueba de Estabilidad en Columna Estática

Esta prueba no está estandarizada por la ASTM. No obstante, es importante porque permite emular la segregación de asfáltenos en un petróleo crudo por efecto de la gravedad en los tanques de tratamiento.

De una mezcla previamente caracterizada por métodos ASTM se conocen la gravedad relativa (ASTM D-1298), densidad relativa API (ASTM D-1298), agua por destilación (ASTM D-4006), contenido de sal (ASTM D-3230), sedimento por extracción (ASTM D-473) y contenido de asfáltenos (ASTM D-3279). (18, 20, 21, 22,23 y 24)

Al inicio de la prueba (tiempo cero,  $t_0$ ) el aceite crudo a condiciones estándar es sellado en la *Columna Estática*. Con ayuda de la *chaqueta de calentamiento* y el *tanque de nitrógeno*, se llevan las condiciones de temperatura y presión a las reales de almacenamiento durante 15 días (tiempo de reposo).

Al finalizar la prueba, se extrae una muestra del fondo de la *Columna Estática* para caracterizarla con los métodos ASTM mencionados y se comparan las propiedades obtenidas al tiempo  $t_0$  y después del tiempo de reposo.

#### 3.3.1 Equipo de Laboratorio

- a) *Columna Estática* – hermética de metal con puertos para la extracción o inyección de fluidos.
- b) *Manómetro* – tipo Bourdon con 0.1 a 2% de error de la totalidad de la escala. La NOM-013-SCFI-2004 cumple con la especificación.
- c) *Termómetro* – debe contar con la especificación ASTM E1 (U. de Barcelona, 2016).

- d) *Chaqueta de Calentamiento* – instalada en la *Columna Estática*, capaz de elevar la temperatura a condiciones de almacenamiento.
- e) *Tanque de Nitrógeno* – instalado en la *Columna Estática*, capaz de generar presión a condiciones de almacenamiento.

### 3.3.2 Procedimiento

- a) Sellar el aceite crudo previamente caracterizado con métodos ASTM en la Columna Estática.
- b) Reposar durante 15 días a condiciones de temperatura y presión que emulen las reales de almacenamiento.
- c) Recolectar del fondo una muestra del aceite crudo.
- d) Caracterizar la muestra. Determinar el contenido de asfaltenos con el método D 7061-04, u otras propiedades representativas conforme la normatividad de la ASTM.
- e) Determinar el Índice de Estabilidad de cada propiedad con la **Ecuación 3.2**.

$$\text{Índice de Estabilidad} = \frac{P_f}{P_0}, \dots\dots\dots 3.2$$

donde:

$P_f$  = propiedad de la mezcla después del tiempo de reposo,

$P_0$  = propiedad de la mezcla al tiempo inicial ( $t_0$ ).

### **3.3.3 Interpretación de Resultados.**

La Prueba de Estabilidad en Columna Estática permite emular el comportamiento composicional (en especial de los asfáltenos) de una mezcla de crudos, durante el periodo de almacenamiento. Ya que la prueba provee únicamente los medios para reproducir el fenómeno de almacenamiento, es necesario determinar las propiedades antes y después de su aplicación.

El índice de estabilidad (Ecuación 3.1) compara las masas de una propiedad antes y después de ponerlo a prueba en la columna estática.

Si su valor es la unidad significa que la propiedad es muy estable, y no cambió después de su almacenamiento a condiciones reales de campo. Sin embargo, si el índice de estabilidad aumenta o disminuye significa que la propiedad no es estable, y dependerá del valor de este índice la severidad de la inestabilidad que presente después de la prueba.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Prueba de la Mancha

Se realizaron 13 Pruebas de la Mancha mostradas en las Figuras 18 y 19. Para el acondicionamiento de las muestras se les extrajo el agua libre y se determinó su densidad relativa API; los resultados se presentan en la **Tabla 4**.

La Corriente 5 presentó una emulsión aceite-agua muy estable; no se pudo determinar el agua libre por efecto de gravedad y diferencia de densidades, por lo que se llevaron a cabo dos destilaciones para conocer el volumen de agua real.

| Propiedad  | Método ASTM | Crudos Pesados |             | Crudos Ligeros |             |             |
|--|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
|  |             | Corriente 1    | Corriente 2 | Corriente 3    | Corriente 4 | Corriente 5 |
| Agua Libre [% vol.]  |             | 15.5           | 6.9         | 7.7            | 61.3        | 0           |
| Agua por destilación antes de la deshidratación [% Vol.]   | D-4006      | -              | -           | -              | -           | 12.7***     |
| Agua por destilación después de la deshidratación [% Vol.] | D-4006      | 0.6            | 0.8         | 0.3            | 0.4         | 0.7         |
| Gravedad específica 60/60 °F                               | D-1298      | 0.955          | 0.955       | 0.845          | 0.8735      | 0.8545      |
| Densidad relativa API                                      |             | 16.65          | 16.67       | 35.94          | 30.49       | 34.09       |

**Tabla 4. Caracterización de Corrientes**

\*\*\*Emulsión muy estable en el aceite crudo de la Corriente 5, lo cual dificultó la separación aceite-agua únicamente por efecto de la gravedad y diferencia de densidades, por lo que se determinó su contenido de agua por destilación.

Una vez acondicionadas las muestras, se prosiguió al desarrollo de la prueba a las corrientes de crudos pesados y ligeros (1, 2, 3, 4 y 5), conforme al procedimiento estandarizado por la ASTM D-4740 (**Figura 18**). Las manchas resultantes se encuentran en base seca. Las corrientes de crudos pesados (1 y 2) no presentan separación composicional, punto homogéneo sin anillo interno (Grado 1 de incompatibilidad). No obstante, las manchas de crudos ligeros (3, 4 y 5) cuentan con diferentes grados de incompatibilidad, los cuales se ajustaron a la descripción de las manchas de referencia de la **Tabla 3**.

En la Corriente 3 se distingue un anillo interno delgado y el fondo es del mismo tono que la base de la mancha, Grado 3 de incompatibilidad. En la Corriente 4 se distingue un anillo interno más definido que la Corriente 3 y el fondo es más oscuro que la base de la mancha, Grado 4 de incompatibilidad. La Corriente 5 tiene una área sólida en el centro de la mancha mucho más oscura que la base, Grado 5 de incompatibilidad.

En un segundo *papel de prueba* (Imagen 4) se encuentran las manchas de las corrientes y las mezclas de los crudos pesados y ligeros y la mezcla de crudos pesados + ligeros. Las manchas se encontraban en base húmeda, es decir, antes de secarse en el horno.

A pesar de la desigualdad en las condiciones, las manchas en base húmeda son semejantes a la base seca. Las corrientes y mezclas de crudos pesado no presentan incompatibilidad. Las manchas de las corrientes de crudos ligeros varían un poco con respecto a las manchas en base seca, pero se ajustan a grados mayores o iguales a 3 de incompatibilidad. La mezcla de crudos ligeros reproduce la incompatibilidad de sus corrientes, anillo interno bien definido y el tono del fondo es más oscuro que la base de la mancha, Grado 4 de incompatibilidad. La mezcla de crudos pesados + ligeros se ajusta al grado 1 de incompatibilidad, punto homogéneo sin anillo interno.

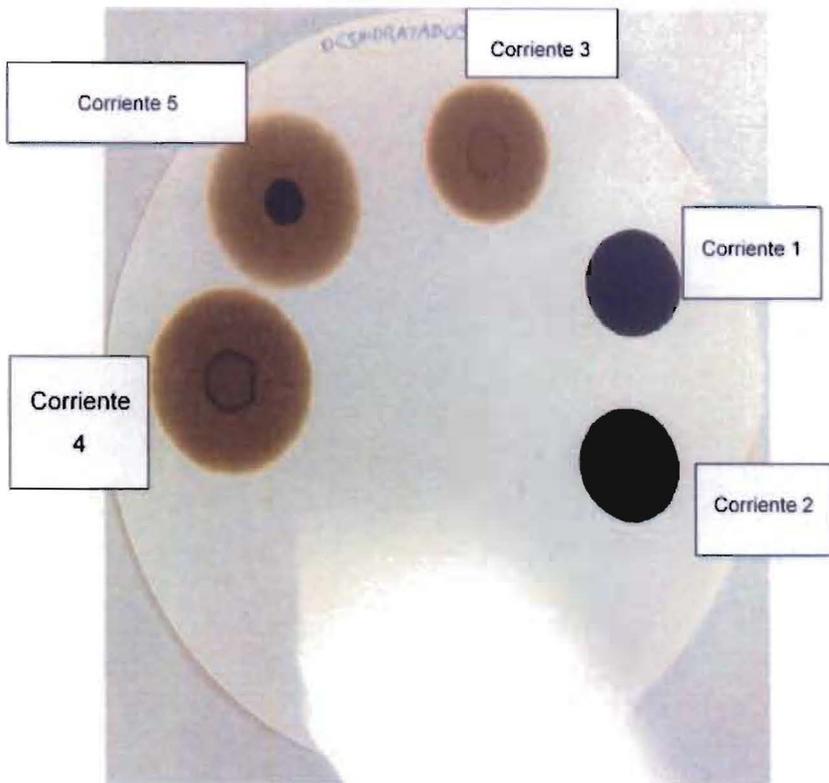


Figura 18. Prueba de la Mancha de las corrientes de crudos pesados y ligeros.

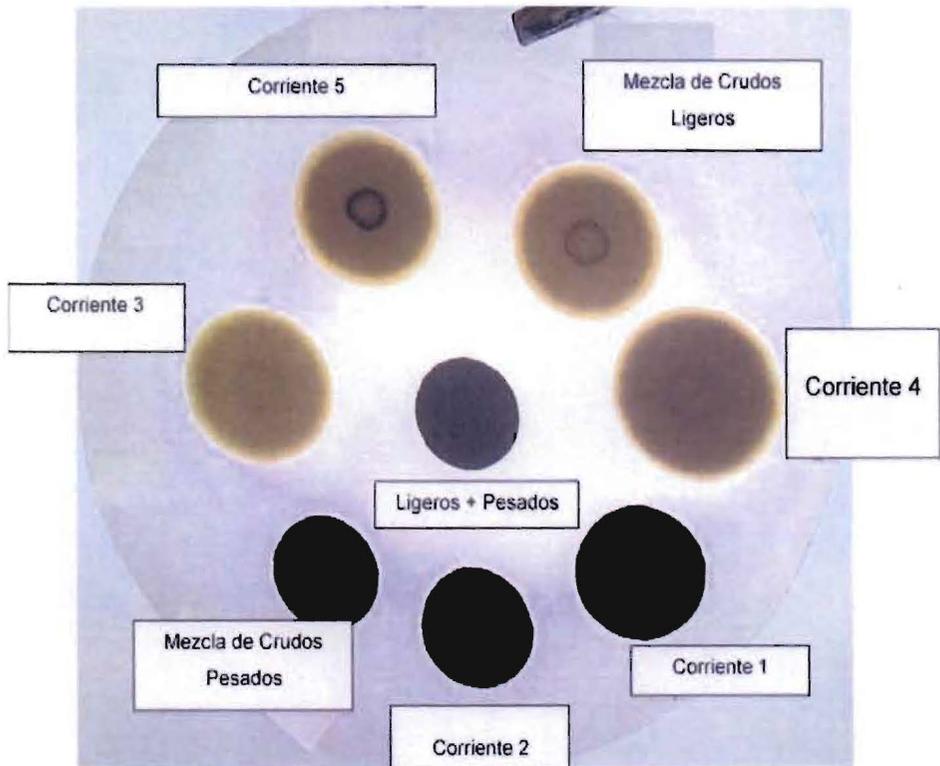


Figura 19. Prueba de la Mancha de las corrientes y mezclas de crudos pesados y ligeros y la Mezcla de C. Pesados + C. Ligeros.

## 4.2 Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan

El No. de Separabilidad calculado por el equipo TurbiScan se muestra en la **Tabla 5**. La estabilidad fue designada conforme los criterios del método, presentes en la **Tabla 4**.

| Tabla 5. "Número de Separabilidad (S) de Aceites Crudos" |                          |             |
|--|--------------------------|-------------|
| Aceite crudo   | No. De Separabilidad (S) | Estabilidad |
| Corriente 1  | 11.3                     | BAJA        |
| Corriente 2  | 10.9                     | BAJA        |
| Mezcla de C. Pesados                                     | 10.4                     | BAJA        |
| Mezcla de C. Ligeros                                     | 1.7                      | ALTA        |
| Mezcla de C. Pesados + Ligeros                           | 12.3                     | BAJA        |

En el caso de los pesados (Mezcla de C. Pesados y Corrientes 1 y 2) el número de separabilidad resultó mayor a 10. Conforme a los criterios de la norma (**Tabla 4**), las mezclas son inestables.

La mezcla de C. Ligeros es muy estable, el S es menor a 5; por lo tanto, no hay separación de fases por efectos de gravedad.

De todos, la mezcla de C. Pesados + Ligeros es el más incompatible y es indicio de la separación de fases que existe durante su almacenamiento en la terminal.

### 4.3 Prueba de Estabilidad en Columna Estática

La prueba de estabilidad del crudo a exportación se acondicionó a 50 °C de temperatura y 1 kg/cm<sup>2</sup> de presión, durante 15 días.

En la **Tabla 6** se muestran las propiedades caracterizadas del crudo antes (Base) y después (Fondo) de la prueba, además del Índice de Estabilidad (IE).

| Tabla 6. Propiedades antes y después de Prueba de Estabilidad en la Columna Estática. |        |       |                       |
|---|--------|-------|-----------------------|
| Propiedad   | Base   | Fondo | Índice de Estabilidad |
| Densidad relativa 60/60 °F  | 0.9253 | 0.924 | 1.001                 |
| Densidad relativa API   | 24.42  | 21.64 | 1.128                 |
| Agua, % Vol.  | 0.5    | 0.8   | 0.625                 |
| Sedimentos, % peso  | 0.211  | 0.24  | 0.879                 |
| Asfaltenos (Insolubles en n-C7), % peso   | 10.64  | 11.59 | 0.918                 |
| Contenido de Sal, lb/1000 bis   | >150   | >150  | 0.000                 |
| Parafina, % peso  | 2.39   | 3.12  | 0.766                 |
| No. de Separabilidad (S)  | 12.3   | 13.1  | 0.939                 |

Los asfaltenos no cambiaron después de la prueba, el IE es muy cercano a uno y por lo tanto se depositan en los tanques de almacenamiento. No obstante, el % de agua, los sedimentos y las parafinas cuentan con un IE mucho mayor a la unidad. Y conforme a los criterios de la prueba son estos los que podrían ocasionar una mezcla heterogénea en los tanques de almacenamiento.

#### 4.4 Identificación del problema y Solución

Para identificar el problema fue necesario analizar los resultados de los experimentos de laboratorio en forma individual y grupal. En la **Tabla 7** se reproduce los resultados de las corrientes y mezclas de crudos de las tres pruebas.

El grupo de trabajo destaco 3 resultados de todas las Pruebas, que su relación arrojó la raíz del problema.

- En la prueba de la mancha, las corrientes y mezclas de ligeros resultaron incompatibles.
- La mezcla más estable que no presento precipitación de asfaltenos, pese su inducción en el Equipo TurbiScan fueron la Mezcla de Ligeros.
- La mezcla final de pesados y ligeros cuenta con parafinas inestab

Tabla 7. Resultados de las pruebas de laboratorio

|   | C 1              | C 2              | C 3          | C 4          | C 5          | Mezcla de C.<br>Ligeros | Mezcla de C.<br>Pesados | Mezcla de C.<br>Pesados + Ligeros             |
|---|------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|---|
| Prueba de la Mancha                         | Compatible       | Compatible       | Incompatible | Incompatible | Incompatible | Incompatible            | Compatible              | Compatible                                    |
| Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan | Baja Estabilidad | Baja Estabilidad | x            | x            | x            | Alta Estabilidad        | Baja Estabilidad        | Baja Estabilidad molecular                    |
| Prueba de Estabilidad en Columna Estática   | x                | x                | x            | x            | x            | x                       | x                       | INESTABILIDAD EN PARAFINAS, AGUA Y SEDIMENTO. |

La Mezcla de Crudos Ligeros, base parafínica, es altamente estable.

A tal grado, que las floculaciones de asfaltenos presentes en la prueba de la mancha no precipitaron en la prueba de Número de Separabilidad en Equipo TurbiScan, pese a inducir su precipitación con n-heptano (saturados).

Al llegar a los tanques de almacenamiento la naturaleza de las parafinas mantiene sus estructuras moleculares juntas, y no es posible obtener una mezcla homogénea como lo demostró la prueba de estabilidad en la columna estática.

Por lo tanto, La incompatibilidad de la mezcla final se debe a los crudos ligeros, por la alta estabilidad de sus parafinas, ya que impide disgregar sus elementos en los componentes de los crudos pesados.

Para solucionar la incompatibilidad de parafinas, se propuso el tratamiento individual de las líneas de ligeros con inyección de químicos especializados, que separen a las moléculas y las encapsulan para evitar su unión durante el transporte.

Para determinar el producto solución para el caso se requieren otros experimentos específicos a las parafinas; existen surfactantes que disminuyen la tensión interfacial entre los compuestos parafínico y agentes secuestrantes, que evitarían su unión.

## Conclusión

Del desarrollo de este trabajo, se indican los siguientes puntos:

- De los análisis realizados, se observó que la incompatibilidad de la mezcla final se debe a la alta estabilidad de la mezcla de crudos ligeros que impide disgregar sus elementos con los petróleos pesados.
- Es sumamente importante conocer la composición de nuestros crudos y su comportamiento durante el transporte o almacenamiento. El medio para lograrlo es mediante pruebas de laboratorio que nos permitan emular los comportamientos de los elementos a diferentes niveles de análisis.
- La diversidad composicional de un crudo es un atributo que le permite ser tan valioso por el sin fin de materiales que podemos obtener y los ingenieros debemos entender, tratar, manejar y transportar su complejidad para brindar a la ciudadanía con productos que le faciliten el día a día.
- En la práctica la naturaleza del comportamiento o composición de las sustancias no siempre son idénticas a lo estipulado en la literatura, pero es necesario que el profesionista tenga bases sólidas para entender los fenómenos que percibe.
- Como ingenieros existen diferentes niveles de estudio para el análisis de un problema o caso de estudio, micro (molecular), macro (un solo material, sustancia o elemento) y a nivel sistema (análisis de todos los elementos que interactúan en el fenómeno a estudiar).

## Recomendaciones

- En ocasiones es necesario desarrollar más de un proyecto, tema o análisis en específico, que permita resolver un problema; por ejemplo: este estudio cumplió su cometido, pero se requiere otro proyecto para desarrollar el químico que desestabilice las parafinas de los crudos ligeros.
- Para desarrollar el químico se requieren otras pruebas de laboratorio que vayan enfocadas únicamente a la composición y comportamiento de los crudos ligeros.
- En cuanto a los estudios de compatibilidad y estabilidad, los experimentos presentes en este escrito son algunos de los muchos disponibles y estandarizados por la ASTM. Se recomienda conocer los demás.
- Para los grupos de trabajo, se recomienda la aplicación de metodologías de desarrollo de proyectos como VCD (Visualización, Conceptualización y Definición) y FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas).

## Referencias

- <sup>1</sup> Colaboradores de Wikipedia. 2018. Petróleos Mexicanos. Wikipedia la Enciclopedia Libre.
- <sup>2</sup> DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. Enero 2017. ESTATUTO Orgánico de Pemex Exploración y Producción, México.
- <sup>3</sup> Pemex Exploración y Producción. INDUCCIÓN A PEMEX EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN, GUÍA DE APRENDIZAJE.
- <sup>4</sup> EIA (U.S. Energy Information Administration). 2016. What drives crude oil prices: Overview. Link: [www.eia.gov/finance/markets/crudeoil/](http://www.eia.gov/finance/markets/crudeoil/)
- <sup>5</sup> M. A. Castanedo. 2003. Química Orgánica. Mc Graw Hill.
- <sup>6</sup> Schlumberger. 2018. OilField Glossary. "API GRAVITY"
- <sup>7</sup> Speight J. 1984. Characterization of Heavy Crude Oils and Petroleum Residues; Symposium International, Paris. Editions Technip
- <sup>8</sup>Castro G., M.; Macías C., A. 2004. Estudio del comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y reológicas de mezclas de crudos y su relación con la compatibilidad. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- <sup>9</sup> Timberlake, K. C. 2013. *Química general, orgánica y biológica. Estructuras de la vida*. Pearson Educación de México.
- <sup>10</sup> M. Alayon. 2004. Cuaderno FIRP S369-PP. "Asfaltenos, ocurrencia y floculación". Universidad de los Andes.
- <sup>11</sup> Doménech y Peral. 2010. "Química Ambiental de sistemas terrestres". Pag. 40. Ed. Reverte.
- <sup>12</sup> Colaboradores de Wikipedia. 2018. *Micela*. Wikipedia, La enciclopedia libre. Link: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Micela&oldid=111375506>

- <sup>13</sup> Universidad de Barcelona. 2016. Operaciones en el Laboratorio de Química. Barcelona, España.
- <sup>14</sup> ASTM International. 2012. Determination of the Maximum Flocculation Ratio and Peptizing Power in Residual and Heavy Fuel Oils (Optical Detection Method). ASTM D7060-12.
- <sup>15</sup> J. G. Speight. The Chemistry and Technology of Petroleum. third edition. Marcel Dekker, Inc.
- <sup>16</sup> ASTM International. 2002. Standard ASTM D 4740-2. Standard Test Method for Cleanliness and compatibility of Residual Fuels by Spot Test. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.
- <sup>17</sup> ASTM International. 2014. Standard ASTM E1-14. Standard Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.
- <sup>18</sup> ASTM International. 2004. Standard ASTM D 7061-04. Standard test method for measuring n-heptane induced phase separation of asphaltene-containing heavy fuel oil as separability number by an optical scanning device. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.
- <sup>19</sup> ASTM International. 2012. Standard ASTM D 396. Specification for Fuel Oils. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.
- <sup>20</sup> ASTM International. 2018. Standard ASTM D 1298. Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.
- <sup>21</sup> ASTM International. 2006. Standard ASTM D 4006. Standard Test Method for Water in Crude oil by Distillation. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.

<sup>22</sup> ASTM International. 2012. Standard ASTM D 473. Standard Test Method for Sediment in Crude Oils and Fuel Oils by the Extraction Method. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.

<sup>23</sup> ASTM International. Standard ASTM D 3230. Standard Test Method for Salts in Crude Oil. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.

<sup>24</sup> ASTM International. Standard ASTM D 3279. Standard Test Method for n-Heptane Insolubles. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.

<sup>25</sup> L. Goual. 2012. Petroleum Asphaltenes, Crude oil emulsions-composition stability and characterization. Intech. ISBN:978-953-51-0220-5.

<sup>27</sup> R. Rodas. Enero 2017. Tesis Doctoral "Evaluación de la estabilidad de asfaltenos de aceites crudos durante su almacenamiento". Instituto Politécnico Nacional. México.

<sup>28</sup>N. Melvin. 2016. Tipos de petróleo crudo según su grado API. VENEZUELA. Disponible en Internet: <http://www.venelogia.com/archivos/9589/>.

## Bibliografía de las Tablas, Figuras e Imágenes.

Figura 1. Diagrama del flujo de trabajo. Fuente: Flores C. 2018. Estudio de Compatibilidad y Estabilidad de Crudos que se mezclan en Terminal. UNAM, México.

Figura 2. Hidrómetro. Fuente: ASTM Committee on Standards. Método estándar ASTM D 1298. Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. Philadelphia.

Figura 3. Ejemplos de moléculas de saturados. Flores C. 2018. UNAM, México.

Figura 4. Dos formas diferentes de la resonancia del benceno (arriba) se combinan para producir una estructura promedio (abajo). Fuente: Colaboradores de Wikipedia. 2018. Hidrocarburo aromáticos. Wikipedia, La enciclopedia libre. Link: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hidrocarburo\\_arom%C3%A1tico&oldid=110241540](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hidrocarburo_arom%C3%A1tico&oldid=110241540).

Figura 5. Compuestos representativos de los Hidrocarburos aromáticos. Fuente: Colaboradores de Wikipedia. 2018. Hidrocarburo aromático. Wikipedia, La enciclopedia libre. Link: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hidrocarburo\\_arom%C3%A1tico&oldid=110241540](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hidrocarburo_arom%C3%A1tico&oldid=110241540).

Figura 6. Ejemplo de molécula de Resina. Fuente: Colaboradores de Wikipedia. 2018. Resina. Wikipedia, La enciclopedia libre.

Figura 7. Ejemplos de moléculas de Asfaltenos. Fuente: Castro G., M.; Macías C., A. 2004. Estudio del comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y reológicas de mezclas de crudos y su relación con la compatibilidad. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

Figura 8. Esquema representativo de una molécula de Resina. Fuente: Flores C. 2018. Estudio de Compatibilidad y Estabilidad de Crudos que se mezclan en Terminal. UNAM, México.

Figura 9. Esquema representativo de un sistema micelar resina-asfalteno. Fuente: Flores C. 2018. Estudio de Compatibilidad y Estabilidad de Crudos que se mezclan en Terminal. UNAM, México.

Figura 10. Precipitación de las moléculas de los asfaltenos. Fuente: M. Alayon. 2004. Cuaderno FIRP S369-PP. "Asfaltenos, ocurrencia y floculación". Universidad de los Andes.

Figura 11. Taponamiento de asfaltenos en tuberías.

Figura 12. Puerquito Limpiador con cepillos circulares. Fuente: Mindiamart.com

Figura 13. Esquema representativo de la distribución de Corrientes y Mezclas que llegan a la Terminal. Fuente: Flores C. 2018. Estudio de Compatibilidad y Estabilidad de Crudos que se mezclan en Terminal. UNAM, México.

Figura 14. Soporte para papel de prueba. Fuente: ASTM International. Standard. 2002. ASTM D4740-02. Philadelphia.

Figura 15. Prueba de la mancha. Flores C. 2018. Estudio de Compatibilidad y Estabilidad de Crudos que se mezclan en Terminal. UNAM, México.

Figura 16. Equipo Turbiscan. Fuente: "STABILITY ANALYZER FOR CRUDE & FUEL OILS", Formulation Smart Scientific Analysis, [www.formulation.com](http://www.formulation.com).

Figura 17. Transmitancia y Reflectividad de las parafinas y asfaltenos. Fuente: Flores C. 2018. Estudio de Compatibilidad y Estabilidad de Crudos que se mezclan en Terminal. UNAM, México.

Tabla 1. Clasificación de los crudos según su densidad API. Fuente: N. Melvin. 2016. Tipos de petróleo crudo según su grado API. VENEZUELA.

Tabla 2. Descripción de las Manchas de Referencia. Fuente: ASTM International. 2002. Standard ASTM D 4740-2. Standard Test Method for Cleanliness and compatibility of Residual Fuels by Spot Test. ASTM Committee on Standards, Philadelphia.

Tabla 3. Valor de la estabilidad. Fuente: ASTM Committee on Standards. Standard test method for measuring n-heptane induced phase separation of asphaltene-containing heavy fuel oil as separability number by an optical scanning device. Philadelphia.