

Modelo matemático para la estimación del porcentaje de asfaltenos en crudo en función de la gravedad API, la temperatura y el índice de refracción

Mathematical model for the estimation of asphaltene percentage on crude oil in based on gravity API, temperature and the refractive index

Tomás Darío Marín Velásquez, María José Rendón Núñez, Marlinis Ysabely Aliendres

Laboratorio de Procesamiento de Hidrocarburos, Escuela de Ingeniería de petróleo de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. Avenida Universidad *Campus* Los Guaritos, Maturín, 6201, estado Monagas, Venezuela.

E-mail: tmarin@udo.edu.ve

Recibido: 29/06/2012

Aceptado: 17/02/2013

RESUMEN

Actualmente existen ensayos que permiten determinar el porcentaje de asfaltenos por separación de los mismos del crudo por extracción con solventes o mediante propiedades como la absorción de luz. Esta investigación se enfocó en la selección de un modelo matemático para estimar el porcentaje de asfaltenos en función de tres propiedades medibles a nivel de laboratorio, la gravedad API (American Petroleum Institute), la temperatura y el Índice de Refracción. Se determinó la gravedad API a 8 muestras de crudo mediante la norma ASTM D287 (American Society for Testing Materials), el Índice de Refracción a cada muestra diluida al 1% en Xileno mediante el procedimiento indicado la norma ASTM D1218 a tres (3) temperaturas y el porcentaje de asfaltenos mediante la norma ASTM D6560. Se correlacionaron por separado las tres variables independientes (API, T e IR) con la variable dependiente (%ASF), se escogieron los mejores modelos en función al coeficiente de determinación R^2 . Con estos se construyeron cinco modelos matemáticos, mediante el programa estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.1 que permitió obtener las ecuaciones correspondientes y se calculó el porcentaje de error relativo promedio (ERP) de los valores estimados de %ASF respecto a los experimentales aceptándose los modelos que presentaran el menor ERP, luego se validaron con ocho muestras adicionales pertenecientes a la población, seleccionándose el modelo con el menor valor de ERP. Se seleccionó como modelo:

$$\%ASF = (44,1618 + 0,0233255T)[0,33536e^{(-0,0976151API)}](0,711428IR^2 + 0,634931IR + 0,335433)$$

El cual tuvo un ERP de 3,97% respecto a la validación externa y un R^2 de 0,98, lo que indica que éste representa la variabilidad de %ASF en un 98,00%.

Palabras claves: asfaltenos, modelo matemático, índice de refracción, gravedad API.

ABSTRACT

Currently there are tests to determine the percentage of asphaltene by separation of crude oil by extraction with solvents or by properties such as light absorption. This research focused on the selection of a mathematical model to estimate the percentage of asphaltene based on three measurable properties in laboratory, the API (American Petroleum Institute) gravity, refractive index and temperature. Found the API gravity to 8 samples of crude oil by the standard ASTM D287(American Society for Testing Materials), the refractive index to each diluted sample to 1%

in Xylene procedure referred to standart ASTM D1747 to tree (3) temperatures and the percentage of asfaltenes by the ASTM D6560 standard. Correlated separately the tree independent variables (API, T and IR) with the dependent variable (%ASF) selecting the best models based on the R^2 determination coefficient. These were five mathematical models by the statistical program STATGRAPHICS PLUS 5.1 which allowed for the corresponding equations and calculated percentage relative average (ERP) of the estimated values of %ASF compared with the experimental accepting models that presented the smaller ERP, then validated with eight additional samples belonging to the population, by selecting the model to submit the lowest value of ERP. Selected as model:

$$\%ASF = (44,1618 + 0,0233255T)[0,33536e^{(-0,0976151API)}](0,711428IR^2 + 0,634931IR + 0,335433)$$

which had an ERP of 3.97% compared with external validation and an R^2 of 0.98, which indicates that it represents the variability of %ASF in 98,00%.

Key words: asfaltenes, mathematical model, refractive index, API gravity.

INTRODUCCIÓN

Los asfaltenos son partículas orgánicas sólidas que contienen anillos condensados de hidrocarburos aromáticos. Estos poseen gran cantidad de carbono, además de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y metales, tales como vanadio (V) y níquel (Ni) (Alayón 2004). Los hidrocarburos están sujetos a fenómenos fisicoquímicos como los cambios de temperatura, presión y composición a lo largo de todo el proceso de producción. Esto puede generar segregación de los componentes y deposición de las partículas más pesadas (asfaltenos, resinas, parafinas), las cuales floculan y precipitan. (García y Moreno 2005). Estos problemas acarrearán pérdidas económicas por reparación y mantenimiento de los equipos de producción, además de paralización de la producción, con una consecuente disminución de la rentabilidad del proceso. A nivel mundial la determinación del porcentaje de asfaltenos en petróleo se realiza de acuerdo al procedimiento establecido en la norma estándar ASTM D6560, adicionando a la muestra una parafina lineal, en este caso el n-heptano para separar los asfaltenos (Mansoori 1997). Este procedimiento estándar presenta el inconveniente de que es muy lento, ya que se requieren alrededor de 9 horas para analizar una muestra. Por tal razón se han propuesto métodos alternativos, que incluyen a la espectroscopía de luz infrarroja (Brian y William 1998) donde se mide la cantidad radiación absorbida por los asfaltenos presentes en una muestra de petróleo. Otro método espectroscópico propuesto es el de radiación ultravioleta (UV) (Zerliaa y Pinellia 1992) donde igualmente obtienen valores estimados para el porcentaje de asfaltenos en función a la cantidad de radiación absorbida y validada con los resultados de la norma estándar de la ASTM. También se han aplicado medidas fotocolimétricas para estimar el contenido de asfaltenos (Mirsayapova y Knyazeva 1976) en base al coeficiente de absorción de luz visible, de los asfaltenos presentes en una muestra de petróleo crudo. Como todos los métodos alternativos la medida de la cantidad de radiación incluyendo a la luz, se planteó la posibilidad de utilizar esta propiedad, como metodología basada en el índice de refracción, considerando que los asfaltenos están presentes en la muestra como partículas sólidas en suspensión (caso de los asfaltenos en el crudo) la velocidad de la luz que los atraviesa disminuye al ser absorbida y desviada de su trayectoria siendo esta disminución proporcional a la cantidad de partículas presentes lo que relaciona a la cantidad de asfaltenos presentes en el petróleo crudo con la velocidad de la luz que lo atraviesa y por ende con el índice de refracción. Con respecto a otros métodos analíticos, las

medidas refractométricas presentan ventajas de facilidad de aplicación, al utilizar un equipo sencillo de gran reproducibilidad si se controla la temperatura en un rango de $\pm 0,2$ °C, con poca cantidad de muestra (de 1 a 2 gotas) [norma ASTM D1218-02]. Aunado a lo anterior también hay que tomar a la gravedad API, que es una medida de la densidad o gravedad específica del petróleo y sus derivados como otra propiedad física que tiene influencia directa sobre el porcentaje de asfaltenos. Se obtuvieron datos en laboratorio de gravedad API, índice de refracción (a 3 temperaturas) y porcentaje de asfaltenos de las muestras y luego mediante procedimientos matemáticos y estadísticos se determinó la relación entre las variables, escogiéndose el modelo matemático que mejor se ajustó a los datos tomando como criterio de selección el porcentaje de error relativo menor, además del coeficiente de determinación R^2 .

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron 8 muestras, de una población de 25 muestras de crudo provenientes de los yacimientos productores del norte del Estado Monagas Venezuela, que se encontraban disponibles en el Laboratorio de Yacimiento de la Escuela de Ingeniería de Petróleo de la Universidad de Oriente, Núcleo de Monagas. A las 8 muestras se les determinó en primer lugar la gravedad API, según el procedimiento establecido en la norma ASTM D287 – 92 (2006) “Método de prueba estándar para la gravedad API del petróleo crudo y productos del petróleo (Método del Hidrómetro)”. Este método de ensayo cubre la determinación por medio de un hidrómetro de vidrio de la gravedad API del petróleo crudo y productos derivados del petróleo normalmente manejados como líquidos y que tengan una presión de vapor Reid (norma ASTM D323-99) de 26 lpca (180 kPa) o menos. Las gravedades son determinadas a 60 F (15,56 °C), o convertidas a valores en 60 °F, por medio de tablas estándar. Estas tablas no son aplicables a líquidos que no sean hidrocarburos o hidrocarburos puros como los aromáticos. Luego se determinó el porcentaje de asfaltenos de las muestras según la norma ASTM D6560-00 (2005) “Método de prueba estándar para la determinación de asfaltenos (Insolubles en n-Heptano) en petróleo crudo y productos derivados del petróleo”. Este método de ensayo cubre un procedimiento para la determinación del contenido de asfaltenos insolubles en n-heptano, del gasóleo, combustible diesel, aceites residuales de combustible, aceites lubricantes, betún y petróleo crudo que se ha destilado a una temperatura de 260 °C.

Por último se prepararon diluciones de las muestras al 1% en Xileno y se le determinó a cada una el índice de refracción mediante un refractómetro digital de ABBE, marca Leika modelo MII aplicando el procedimiento establecido en la norma ASTM D1218-02 (2002) “Método de prueba estándar para el índice de refracción y dispersión refractiva de hidrocarburos líquidos”. Este método de ensayo cubre la medición de índices de refracción con una precisión de cuatro decimales para hidrocarburos transparentes y ligeramente coloreados en un rango de 1,3300 a 1,5000.

Los datos obtenidos se tabularon y procesaron por análisis de regresión para establecer la relación entre el %ASF y cada una de las variables independientes de forma separada, mediante el programa estadístico STATGRAPHIC PLUS 5.1. Los modelos de regresión estudiados fueron: lineal, exponencial, logarítmico, cuadrático y potencial. Se escogieron los modelos que mejor se ajustaron a los datos, es decir los que mejor representaron la relación entre las variables, tomando como base el coeficiente de determinación R^2 . Luego se combinaron los modelos escogidos en cinco ecuaciones, para las cuales el programa STATGRAPHIC PLUS 5.1 determinó los

coeficientes y se obtuvieron los modelos matemáticos que relacionaron a las cuatro variables. Luego a través de una validación interna estableciendo como criterio que los menores errores relativos promedios (ERP) de los valores estimados, se seleccionaron los tres mejores modelos y mediante una validación externa aplicando el mismo criterio para ERP pero con ocho muestras adicionales pertenecientes a la población, se seleccionó el modelo matemático a ser usado para la estimación del %ASF como una función de API e IR.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la relación %ASF – IR y %ASF - API

Una vez aplicados los procedimientos establecidos en las normas ASTM, para el desarrollo del modelo matemático, se obtuvieron los datos necesarios, mostrados en el cuadro 1.

Cuadro 1. Datos obtenidos a través las normas ASTM para el desarrollo del modelo matemático

Muestra	%ASF	API	IR@T =30°C	IR @T = 35°C	IR@T = 38°C
1	1,01	38,8	1,4919	1,4881	1,4875
2	4,04	23,3	1,4924	1,4888	1,4881
3	4,21	24,3	1,4924	1,4888	1,4881
4	3,80	25,7	1,4925	1,4889	1,4882
5	4,44	22,5	1,4925	1,4889	1,4882
6	7,09	18,1	1,4929	1,4895	1,4887
7	7,24	19,1	1,4929	1,4895	1,4887
8	8,30	16,9	1,4930	1,4897	1,4889

En los resultados mostrados en el cuadro 1, se puede observar que se estudiaron crudos con porcentajes de asfaltenos entre 1,01 y 8,30%, con gravedades API entre 16,9 y 38,8. Según la clasificación estándar de la API (ASTM D1250-04) las muestras se pueden clasificar como crudos pesados (10,0 – 19,9 API), medianos (20,0 – 29,9 API) y livianos (30,0 – 39,9 API), en base a esto y a los datos del cuadro 1, existen en la muestra un 50,0% de crudos medianos, 37,5% de crudos pesados y 12,5% de crudos livianos. Observando las aparentes relaciones entre las variables, el %ASF presenta una relación de proporcionalidad directa con el IR a todas las temperaturas. Siendo el IR, una relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz al atravesar la muestra (Luetich, 2002), un aumento en el IR se debe a una disminución de la velocidad de la luz que atraviesa la muestra, consecuencia de que una mayor cantidad de asfaltenos, dificulta el paso de la luz. De acuerdo a lo anterior, se realizó un análisis de regresión para determinar la relación entre estas variables, mostrándose los resultados en el cuadro 2 para la temperatura de 30 °C.

Cuadro 2. Valores de coeficientes de correlación para la relación entre %ASF e IR

Modelo	R ²
Lineal	0,992

Exponencial	0,992
Logarítmico	0,912
Cuadrático	0,996
Potencial	0,912

Como se puede observar en el cuadro 2, existe una relación muy fuerte para todos los modelos, siendo los que presentan los mayores valores de coeficiente de determinación los modelos lineales, exponencial y cuadrático, definiendo todos ellos la variabilidad de %ASF en más de 99,00%, obteniéndose el mismo resultado para todas las temperaturas.

Respecto a la relación entre el %ASF y la API no se observa en primer instancia una tendencia, ya que la gravedad API es una unidad de densidad y esta propiedad no es dependiente únicamente del porcentaje de asfaltenos, por ejemplo las muestras 2 y 3 tienen gravedades API de 23,3 y 24,3, esperándose que la muestra 2 por ser más pesada tuviese mayor porcentaje de asfaltenos, sin embargo presenta un valor de 4,04% el cual es menor que el de la muestra 3 que es menos pesada (4,21%). Aun cuando no se observa una relación aparente entre el %ASF y la gravedad API, se realizó un análisis de regresión obteniéndose los coeficientes de determinación para varios modelos como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Valores de coeficientes de correlación para la relación entre %ASF y API

Modelo	R ²
Lineal	0,896
Exponencial	0,870
Logarítmico	0,695
Cuadrático	0,926
Potencial	0,636

Como se observa en el cuadro 3, existe una correlación de fuerte a muy fuerte entre las variables %ASF y API para los modelos lineal, exponencial y cuadrático, siendo este último el modelo que mejor se ajustó definiendo la variabilidad de %ASF en un 92,6%, seleccionándose los mismos como referencia para el desarrollo del modelo que relaciona las tres variables en estudio.

Propuestas de modelos matemáticos de %ASF como función de T, IR y API

De acuerdo a lo obtenido en el análisis individual de cada una a las variables, se propusieron cinco (5) modelos matemáticos, mostrados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Modelos matemáticos propuestos para la relación $\%ASF = f(API, T, IR)$

Modelo	Descripción	Ecuación
1	Lineal múltiple	$\%ASF = A + B * T + C * API + C * IR$

2	Lineal - Cuadrático	$\%ASF = (A + B \cdot T)(C + D \cdot API)(E \cdot IR^2 + F \cdot IR + G)$
3	Exponencial - Cuadrático	$\%ASF = (A + B \cdot T)(C \cdot e^{D \cdot API}) \cdot (E \cdot IR^2 + F \cdot IR + G)$
4	Exponencial - Lineal	$\%ASF = (A \cdot e^{B \cdot API})(C + D \cdot IR)(E + F \cdot T)$
5	Cuadrático - Cuadrático	$\%ASF = (A \cdot API^2 + B \cdot API + C)(D \cdot IR^2 + E \cdot IR + F)(G \cdot T^2 + H \cdot T + I)$

A través del programa estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.1, se obtuvieron los coeficientes de cada ecuación y su respectivo análisis estadístico:

Modelo 1: Lineal múltiple

El modelo ajustado fue el siguiente

$$\%ASF = -964,004 + 0,355443T - 0,285407API + 646,694IR \quad (1)$$

Este modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,8862, lo que indica que el modelo explica un 88,62% de la variabilidad en %ASF, observándose una correlación fuerte entre las variables.

Modelo 2: Lineal - Lineal - Cuadrático

El modelo ajustado fue el siguiente

$$\%ASF = (7,85657 + 0,00977424T)(10,9981 - 0,280103API)(0,0930153IR^2 + 0,0258939IR - 0,105662) \quad (2)$$

Este modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,8644 (correlación fuerte), lo que indica que el modelo explica un 86,44% de la variabilidad en %ASF.

Modelo 3: Lineal - Exponencial - Cuadrático

El modelo ajustado fue el siguiente

$$\%ASF = (44,1618 + 0,0233255T)[0,33536e^{(-0,0976151 API)}](0,711428IR^2 + 0,634931IR + 0,335433) \quad (3)$$

Este modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,9800, lo que indica una correlación muy fuerte entre las variables y que el modelo explica un 98,00% de la variabilidad en %ASF.

Modelo 4: Exponencial - Lineal - Lineal

El modelo ajustado fue el siguiente

$$\%ASF = 0,436268e^{(-0,097647 API)}[(0,31421 + 1,47057 * IR)(39,0423 + 0,0124541T) \quad (4)$$

Este modelo presentó un coeficiente de determinación R² de 0,9799, lo que indica que el modelo explica un 97,99% de la variabilidad en %ASF. Este modelo presentó correlación muy fuerte entre las variables.

Modelo 5: Cuadrático – Cuadrático - Cuadrático

El modelo ajustado fue el siguiente

$$\%ASF = (-0,000618906T^2 + 0,351396T + 96,5886)(0,00861309API^2 - 0,650928API + 12,8359)(0,0337815IR^2 - 0,0020506IR - 0,0543144) \quad (5)$$

Este modelo presentó un coeficiente de determinación R² de 0,9780, lo que indica que el modelo explica un 97,80% de la variabilidad en %ASF, siendo esta una correlación muy fuerte.

De acuerdo a los resultados se tiene que los modelos 3, 4 y 5 presentan una correlación muy fuerte entre las variables superando el 97,00% de ajuste y los modelos 1 y 2 presentan una correlación fuerte entre las variables con ajustes entre 80 y 90%.

Validación de los modelos propuestos

En el cuadro 5, se muestran los resultados de los %ASF estimados por cada uno de los modelos, los cuales se compararon con los valores obtenidos experimentalmente para la temperatura de 30 °C. Se toma esta temperatura como ejemplo ya que los valores fueron los mismos con las demás temperaturas (35 y 38 °C)

Cuadro 5. Valores de %ASF estimados por los modelos propuestos para 30 °C

IR	%ASF	API	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
1,4919	1,01	38,8	0,39	0,15	0,98	0,98	1,04
1,4924	4,04	23,3	5,13	5,11	4,44	4,43	4,47
1,4924	4,21	24,3	4,85	4,79	4,02	4,02	4,00
1,4925	3,80	25,7	4,51	4,34	3,51	3,51	3,42
1,4925	4,44	22,5	5,43	5,36	4,80	4,79	4,86
1,4929	7,09	18,1	6,94	6,78	7,38	7,37	7,40
1,4929	7,24	19,1	6,66	6,46	6,69	6,68	6,77
1,4930	8,30	16,9	7,35	7,16	8,29	8,29	8,21

Para poder definir cuál de los modelos se ajustó mejor a los valores experimentales se calcularon, a partir de los valores estimados por cada una de las ecuaciones, los errores relativos porcentuales, los cuales se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Errores Relativos calculados para cada modelo respecto a los valores experimentales

Modelo 1	Modelo2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
61,39	85,15	2,97	2,97	2,97

26,98	26,49	9,90	9,65	10,64
15,20	13,78	4,51	4,51	4,99
18,68	14,21	7,63	7,63	10,00
22,30	20,72	8,11	7,88	9,46
2,12	4,37	4,09	3,95	4,37
8,01	10,77	7,60	7,73	6,49
11,45	13,73	0,12	0,12	1,08
20,77	23,65	5,62	5,56	6,25

En la tabla anterior se muestran los ERP calculados y se observa que los modelos 3, 4 y 5 poseen $ERP \leq 10\%$ con lo que se podría deducir que uno de ellos sería el modelo a seleccionar, pero dado que los porcentajes de error están muy próximos se decidió realizar un análisis estadístico basado en el procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD) para establecer si los ERP son estadísticamente iguales con un nivel de confianza de 95%. Los resultados del LSD se muestran en el cuadro 7 en la que se identifica un (1) solo grupo homogéneo según la alineación del signo X en la columna. Dentro de cada columna, los niveles que tienen signo X forman un grupo de medias entre las cuales no hay diferencias estadísticamente significativas. Lo anterior indica que los modelos 3, 4 y 5 poseen ERP que son estadísticamente iguales con un nivel de confianza de 95%.

Cuadro 7. Resultados del procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher (LSD) para las medias de los ERP de los modelo 3, 4 y 5

Método: 95,0 porcentaje LSD = 3,447			
Muestra	Frecuencia	Media	Grupos homogéneos
Muestra 3	8	5,62	X
Muestra 4	8	5,56	X
Muestra 5	8	6,25	X

El cálculo de los ERP para las temperaturas de 35 y 38 °C arrojaron resultados estadísticamente iguales a los de 30 °C (cuadro 8), por eso para la validación externa sólo se tomó en cuenta esta temperatura.

Cuadro 8. Errores relativos porcentuales para las temperaturas de 35 y 38 °C

	ERP	
	35 °C	38 °C
Modelo 1	24,54	20,87
Modelo 2	23,61	23,67
Modelo 3	5,64	5,63
Modelo 4	5,63	5,61
Modelo 5	6,12	6,16

Este análisis llevó a que se tomaran en cuenta los modelos 3, 4 y 5 para realizar la validación con las 8 muestras extras y así seleccionar el modelo definitivo, Los resultados de esta validación se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9. Resultados de la validación de los modelos seleccionados

IR	%ASF	API	Modelo 3	ERP 3	Modelo 4	ERP 4	Modelo 5	ERP 5
1,4923	2,73	28,7	2,62	4,06	2,62	4,14	2,38	12,95
1,4925	2,81	28,2	2,75	2,11	2,75	2,20	2,53	9,89
1,4925	2,68	28,7	2,62	2,25	2,62	2,34	2,38	11,23
1,4925	2,85	28,4	2,70	5,35	2,69	5,44	2,47	13,34
1,4926	3,66	25,5	3,58	2,17	3,58	2,26	3,50	4,28
1,4928	11,23	14,4	10,58	5,76	10,58	5,82	10,02	10,82
1,4928	8,82	16,6	8,54	3,20	8,53	3,27	8,40	4,72
1,4928	10,3	15,4	9,60	6,81	9,59	6,87	9,26	10,07
Promedio				3,97		4,04		9,66

Como se observa en el cuadro 9, al igual que en el caso anterior el modelo 3 fue el que mejor se ajustó a los valores experimentales con un ERP de 3,97% (< 5%). Un análisis por LSD, similar al que se realizó anteriormente a los resultados de los 3 mejores modelos, mostró que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores de ERP para los modelos 3 y 4, por lo que cualquiera de los dos modelos podría ser utilizado para la estimación del porcentaje de asfaltenos, pero tomando en cuenta la relación no lineal entre %ASF e IR (Lucca y Fernández, 2005) se decidió seleccionar el modelo 3 (Lineal - Exponencial – Cuadrático).

CONCLUSIONES

El modelo que mejor correlaciona las cuatro variables en estudio es el Lineal-Exponencial-Cuadrático con un porcentaje de error relativo promedio menor a 10% y un coeficiente de determinación que define la variabilidad del porcentaje de asfaltenos en un 98,00%.

El modelo matemático seleccionado es aplicable a muestras de petróleo crudo con gravedades API entre 14,0 y 38,8 y porcentajes de asfaltenos entre 1,01 y 11,20% con un error relativo promedio de $\pm 3,97\%$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAYÓN, M, 2004. *Asfaltenos. Ocurrencia y Floculación*. Documento en Línea. Disponible en: http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S369PP_Asfaltenos.pdf

ASTM D1218 – 02. 2002. *Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

ASTM D1250-04, 2004. *Standard Guide for Use of the Petroleum Measurement Tables*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA

- ASTM D287 – 92, 2006. *Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method)*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA
- ASTM D6560 – 00. 2005. *Standard Test Method for Determination of Asphaltenes (Heptane Insolubles) in Crude Petroleum and Petroleum Products*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- BRIAN K. W and WILLIAM T. W. 1998. *Determination of Asphaltenes in Petroleum Crude Oils by Fourier Transform Infrared Spectroscopy*. Energy Fuels, 12 (5), pp 1008–1012.
- GARCÍA, C. y MORENO, S. 2005. *Diseño de un equipo para la medición de la precipitación de asfaltenos y la evaluación de productos químicos inhibidores/dispersantes bajo condiciones de operación*. Trabajo de Grado Ingeniería de Petróleo. Universidad de Oriente Núcleo de Monagas. Maturín, Monagas, Venezuela.
- LUCCA J. y FERNÁNDEZ T. 2005. *Evaluación de la factibilidad de la aplicación del método de refractometría para cuantificar asfaltenos*. Trabajo de Grado Ingeniería de Petróleo. Universidad de Oriente Núcleo de Monagas. Maturín, Monagas, Venezuela.
- LUETICH, J. 2002. *Ley de Snell, formalización de Descartes y principio de Fermat*. Documento en Línea. Disponible en: <http://www.luventicus.org/articulos/02A033/>
- MANSOORI, G.A. 1997. *Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in oil wells*. Journal of Petroleum Science and Engineering 17(1-2):101-111.
- MIRSAYAPOVA, L.I. and KNYAZEVA, T. N. 1976. *Rapid method of determination of asphaltene content in petroleum crudes and products*. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 12: 805-807.
- ZERLIAA, T and PINELLIA, G. 1992. *Asphaltenes determination in heavy petroleum products by partial least squares analysis of u.v. data*. Fuel, 71(5): 559-563.