

Comunicación Técnica

Correlación entre los métodos FIA y SFC para la determinación de aromáticos en fracciones del petróleo

G. Marroquín,^{a,*} G. E. Santana,^{a,b} J. Ancheyta,^a A. Ramírez^a y H. del Río^a

^a Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas 152, 07730 México, D. F.

Fax: (55) 3003-8429, E-mail: gmarroq@imp.mx

^b Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química y Industrias Extractivas, México 07738, D. F.

Recibido el 5 de julio del 2002; aceptado el 10 de diciembre del 2002

Resumen. Se determinó la concentración de aromáticos en diferentes destilados intermedios (gasóleo ligero primario, querosina y turbosina) y productos hidrotratados mediante los métodos ASTM D-1319 (FIA: Fluorescent Indicator Adsorption) y ASTM D-5186 (SFC: Supercritical Fluid Chromatography). Con cada método se analizaron 180 muestras y con la información experimental se desarrolló una correlación entre los métodos FIA y SFC, encontrándose una dependencia lineal simple. El error promedio entre los valores de concentración de aromáticos, experimental y calculado, fue de 2.3 %.

Palabras clave: Aromáticos, FIA, SFC, correlación.

Introducción

La aplicación de métodos experimentales de caracterización permite conocer la naturaleza física y química del petróleo y de sus fracciones; sin embargo, el uso de las técnicas de caracterización frecuentemente es costoso y lento, por lo que se han buscado alternativas para reducir el tiempo de respuesta a un costo más razonable. Una opción es el uso de correlaciones, las cuales se desarrollan con bases teóricas o empíricas, utilizando información experimental.

En la literatura se encuentran descritas diversas correlaciones para predecir el valor de ciertas propiedades, ya sea del petróleo o de una fracción del mismo, tales como la concentración de azufre [1,2], el peso molecular [3], la densidad [4], la presión de vapor [5], la temperatura de escurreimiento [6], etc. La mayoría de estas correlaciones emplean datos de gravedad API y la curva de destilación ASTM.

Una propiedad importante, a la cual no se le ha puesto suficiente interés en el desarrollo de correlaciones, es la concentración de aromáticos. Esta propiedad, en conjunto con otras como son el número de cetano, la concentración de azufre, el intervalo de ebullición, etc., se utilizan básicamente para evaluar la calidad del combustible diesel. Cabe destacar que la tendencia mundial exige restricciones ambientales más estrictas para este combustible, en donde se han establecido valores máximos para el contenido de aromáticos (Tabla 1) [7, 8, 9].

Para la cuantificación del contenido de aromáticos en las fracciones del petróleo se dispone de varios métodos experimentales [10], sin embargo, no todos presentan el mismo

Abstract. Aromatics concentration in middle distillates (Straight Run Gas Oil, Kerosene and Jet Fuel) and hydrotreated products were measured by ASTM D-1319 (FIA: Fluorescent Indicator Adsorption) and ASTM D-5186 (SFC: Supercritical Fluid Chromatography) methods. With each method 180 samples were analyzed and with the experimental information a linear correlation between FIA and SFC methods was developed. The average deviation between experimental and calculated aromatics concentrations was 2.3 %.

Key words: aromatics, FIA, SFC, correlation.

alcance, puesto que existen limitaciones en los intervalos de ebullición, la viscosidad y el color, principalmente. Además, la precisión y las unidades de medida (% vol, % peso ó % mol), también son diferentes.

En el caso de los destilados intermedios del petróleo (gasóleo ligero primario, querosina y turbosina), el método más utilizado para la determinación del contenido de aromáticos es el ASTM D-1319, mejor conocido como FIA (Fluorescent Indicator Adsorption) [11]. Este método se ha venido empleando desde hace varios años para determinar la concentración de aromáticos en el combustible diesel [12].

Las unidades reportadas para el contenido de aromáticos son % vol. Recientemente, la ASTM publicó un nuevo método (ASTM D-5186) para la determinación de aromáticos por medio de la cromatografía supercrítica (SFC: Supercritical Fluid Chromatography) [13]. La ventaja de este método es, que además de los aromáticos totales, también se determina la distribución de los mismos (mono-, di-, tri- y poli-aromáticos). A diferencia del método FIA, el método SFC reporta la concentración de aromáticos en % peso, y como se muestra en la Tabla 1, algunos países prefieren regular el contenido de estos compuestos en % peso.

Para cambiar el porcentaje de aromáticos de unidades volumétricas a gravimétricas, se puede emplear la fórmula siguiente [9]:

$$\text{Aromáticos en \% peso} = \frac{\rho_{\text{aromáticos}}}{\rho_{\text{muestra}}} \times \text{Aromáticos en \% volumen} \quad (1)$$

Tabla 1. Contenido máximo de aromáticos en el combustible diesel en diferentes países.

Países	Aromáticos, % vol.	Aromáticos, % peso	PAH ^a , % peso
México PEMEX ^b	30	NE	NE
U.S.A. EPA ^b	35	NE	NE
U.S.A. CARB ^b	10	NE	1.4
Suecia Clase I ^c	5	NE	0.02 % vol.
Alemania ^d	NE	10	< 2
Europa ^e	NE	NE	6-11
Europa ^f	NE	NE	1-6
Propuesta mundial	15	NE	2 % vol.

^a poliaromáticos, ^b1993, ^c1992, ^d2001, ^e2000,^f Propuesto para el año 2005. NE: No existe especificación.

Al aplicar esta fórmula, la densidad de la muestra ($r_{muestra}$) y la concentración de aromáticos en % vol. (método FIA) son valores conocidos, sin embargo, la densidad de los aromáticos ($r_{aromáticos}$) se desconoce, siendo su determinación difícil, ya que los aromáticos deben separarse del resto de compuestos y, posteriormente, se evalúa la densidad de los mismos.

Otra manera de convertir los datos de concentración de aromáticos evaluados con el método FIA (% vol) a los obtenidos con el método SFC (% peso) puede ser con una ecuación empírica, para lo cual se requiere la información suficiente sobre el contenido de aromáticos determinados con ambos métodos. Al respecto existen algunos trabajos reportados en la literatura, sin embargo, las correlaciones se han obtenido con pocos datos y no se reporta la confiabilidad de las mismas [12].

Por tal motivo, en este trabajo se determinó experimentalmente el contenido de aromáticos de 180 muestras de destilados intermedios usando los métodos FIA y SFC, con el fin de buscar una correlación entre ambos métodos.

Métodos FIA y SFC

El método FIA cubre un intervalo de concentración de aromáticos totales de 5-99 % vol. y es aplicable a fracciones que tengan una temperatura final de ebullición (TFE) menor a 315 °C y sin coloración, ya que estas propiedades pueden interferir con la lectura de la banda cromatográfica, por lo que este método es más adecuado para gasolinas, turbosinas y querosinas.

A pesar de las limitaciones mencionadas, el método FIA se puede aplicar a concentraciones menores a 5 % vol., aunque la precisión no ha sido determinada [11]. No obstante, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Agencia de Protección del Medio Ambiente del Estado de California (CARB) eligieron el método FIA para la determinación del contenido de aromáticos en los combustibles diesel, aunque estos combustibles presentan generalmente una TFE mayor de 315 °C.

Algunos trabajos de la literatura han reportado una variación de aromáticos de 3 % vol. medidos en una misma muestra de diesel, cuya reproducibilidad es menor a la del procedimiento del método [14].

La ASTM ha reportado un nuevo método (SFC) que cubre una determinación de aromáticos totales de 1-75 % peso. Este método no tiene las limitaciones del método FIA y además presenta mayor exactitud para la medición de aromáticos en combustible diesel [10, 13].

El método SFC es más versátil porque también puede cuantificar los tipos de compuestos aromáticos (mono-, di-, tri- y poli-aromáticos). Esto es importante y de gran interés para las especificaciones futuras del combustible diesel, ya que éstas requieren el tipo de aromático. El tiempo de análisis mediante este método es menor al del FIA, pero el costo es mayor. Las diferencias de cada método se pueden observar claramente en la Tabla 2.

La importancia de aplicar los métodos FIA o SFC a un producto del petróleo depende principalmente de la legislación, de la especificación requerida o del carácter de los datos requeridos. Debido a lo anterior, el método FIA es un procedimiento que se seguirá aplicando para la cuantificación de los aromáticos en el combustible diesel, aunque el método SFC ha sido elegido por la ASTM para sustituir al FIA y por la necesidad de conocer el tipo de aromático, el método FIA podría ser reemplazado totalmente en un futuro cercano [10]. Cabe mencionar que actualmente el método SFC no está disponible en todos los laboratorios de análisis de petróleo.

Experimentación

Destilados intermedios

El gasóleo ligero primario (GLP), la querosina (Q) y la turbosina (T) se recuperaron a partir de tres crudos con diferentes

Tabla 2. Características de los métodos FIA Y SFC.

Método ASTM	FIA	SFC
Técnica analítica	Cromatografía de adsorción	Cromatografía de fluido supercrítico con detector infrarrojo
Aromáticos	Totales	Totales y tipos (mono, di, tri y poli)
Unidades	% volumen	% peso
Intervalo de ebullición, °C	< 315	200 a 400
Tiempo de análisis, h	3 a 8	1 a 3
Precisión	Depende del analista	Buena
Exactitud	Mala en el diesel	Buena
Amplia disponibilidad	Sí	No
Costo	Bajo	Elevado

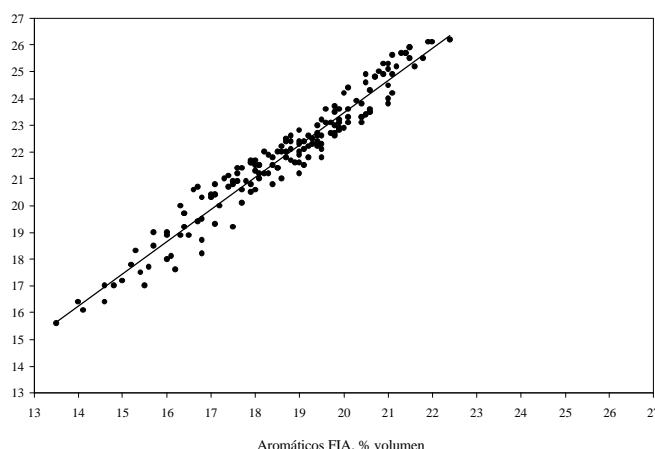


Fig. 1. Concentración de aromáticos en productos del petróleo determinados con los métodos FIA y SFC.

propiedades. Los intervalos de ebullición, así como las concentraciones de azufre total presentaron valores de 154-389 °C y 1.10-1.15 % peso para los GLP's, 281-313 °C y 0.63-0.70 % peso para las Q's y 144-236 °C y 0.13-0.25 % peso para las T's. El color ASTM fue menor a 1.5 para los GLP y Q, mientras que las turbosinas presentaron un color Saybolt entre 15 y 21.

Con estos destilados intermedios se formularon mezclas sintéticas en diferentes proporciones de GLP, Q y T. El intervalo de ebullición y el contenido de azufre se redujeron a valores de 141-382 °C y 0.55-0.97 % peso respectivamente, y el color ASTM fue menor a 1.

Para eliminar el color de las muestras, los destilados intermedios y las mezclas se hidrotratataron en una planta piloto utilizando dos catalizadores comerciales a temperaturas de reacción de 340-360 °C, LHSV de 1.5-2.0 h⁻¹, presión de 54 kg / cm² y relación H₂ / HC de 2000 ft³ / bbl.

Análisis de cargas y productos

Las diferentes muestras se caracterizaron mediante los métodos ASTM que se reportan en la Tabla 3.

Después del hidrotratamiento, los productos presentaron color ASTM menor a 0.5 cuando se usaron como carga diesel y querosina y color Saybolt entre 21 y 30 con turbosina. El azufre total se redujo a menos de 500 ppm y el intervalo de ebullición fue de 140-372 °C.

El contenido de aromáticos en los destilados intermedios y en los productos (180 muestras) se determinaron por los métodos FIA (ASTM D-1319) y SFC (ASTM D-5186).

Para cuantificar los aromáticos en % vol. (método FIA) se utilizó una columna de adsorción de vidrio de 1.6 mm de diámetro y 1630 mm de longitud, dividida en tres secciones: cargado de muestra (150 mm), separación (190 mm) y analizador (1220 mm). La columna se empacó con sílica-gel marca Grace, ya que ésta cumple con las especificaciones recomendadas por el método.

Para determinar la concentración de aromáticos en % peso (método SFC) se utilizó un cromatógrafo Dionex serie 600 con detector de ionización de flama (FID) y una columna cromatográfica con una longitud de 250 mm y diámetro interno de 2 mm empacada con sílica-gel SI 60. Se inyectó 0.5 L de muestra a 30 °C, la temperatura del FID se controló en 350 °C. Se usó dióxido de carbono (CO₂) como gas de arrastre bajo condiciones supercríticas (115 atm) con una pureza del 99.99 %.

La preparación de la muestra, el aparato, la calibración y el procedimiento aplicado se realizaron con base en las especificaciones de los métodos FIA y SFC [11, 13].

Resultados y Discusión

Aromáticos totales determinados por los métodos FIA y SFC

Las concentraciones de aromáticos en las fracciones del petróleo determinadas por ambos métodos se presentan en la Fig. 1. El intervalo de concentración de aromáticos, medido con el método FIA, es de 13.5 a 22.5 % vol., mientras que con el método SFC el intervalo varía entre 15.5 y 26.5 % peso [15].

Con base en estos resultados se nota que los valores correspondientes a los aromáticos analizados con el método FIA son menores a aquellos obtenidos con el método SFC y además se observa que la diferencia de los resultados entre los métodos va siendo mayor, conforme aumenta la concentración de los aromáticos.

En la Fig. 1 también se observa que existe una dependencia lineal entre los valores determinados por ambos métodos. Un comportamiento similar fue encontrado por Lee y cols. [12], aunque ellos utilizaron la técnica HPLC (High Pressure Liquid Chromatography).

Correlación entre los métodos FIA y SFC

El criterio más ampliamente usado para conocer si una ecuación es o no apropiada para un ajuste en particular, es el coeficiente de correlación (r^2), el cual puede variar entre 0 y 1. Cuando r^2 se aproxima a la unidad, la ecuación es más adecuada para usarse para correlacionar una determinada variable.

El comportamiento observado en la Fig. 1 facilitó la tarea de desarrollar correlaciones más complejas, ya que finalmente los valores experimentales se ajustaron a una ecuación lineal. Con base en lo anterior, el valor experimental del método SFC depende del resultado obtenido por el método FIA de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SFC = a + b \text{ FIA} \quad (2)$$

Partiendo de la ecuación anterior, los valores de concentración de aromáticos de las diferentes muestras se ajustaron mediante una regresión lineal [16], obteniéndose la siguiente expresión:

Tabla 3. Métodos utilizados para la caracterización de las muestras.

Propiedad	Método ASTM
Color ASTM	D-1500
Color Saybolt	D-156
Destilación atmosférica	D-86
Azufre total	D-4294

El coeficiente r^2 para este ajuste fue de 0.9446. Se analizaron otras correlaciones lineales en las que se involucraron la densidad, el azufre y el índice de refracción, sin embargo, los valores de r^2 fueron menores a de 0.90 [15].

$$SFC = 1.1979 \text{ FIA} - 0.4998 \quad (3)$$

De acuerdo con la ecuación (1), se debería tener una ordenada al origen igual a cero, sin embargo, el mejor ajuste se tuvo con la ecuación (3) en donde la ordenada al origen tiene un valor de -0.4998.

Con la ecuación (1) se obtuvo un valor de r^2 igual a 0.90. La justificación principal de tener un mejor ajuste con la ecuación (3) se debe principalmente a dos razones: la repetibilidad de los métodos y la posible diferencia entre los tipos de aromáticos cuantificados con ambos métodos.

Desviación de los resultados obtenidos con la correlación

La correlación desarrollada presenta una buena estimación del contenido de aromáticos por el método SFC, a partir de datos experimentales obtenidos por el método FIA, como se muestra en la Fig. 2. El error promedio encontrado fue de 2.3 %, obteniéndose una diferencia máxima absoluta de 1.0 % peso.

Por lo tanto, la ecuación (3) puede emplearse de manera confiable para calcular los aromáticos totales en % peso con la precisión mencionada anteriormente. Además de los errores bajos en las predicciones, la correlación presenta la ventaja de utilizar información obtenida con el método FIA, que es más barato que el método SFC y disponible en los laboratorios del petróleo.

Aplicación de la correlación a otras muestras

Como ya se mencionó, el método FIA es recomendable para fracciones del petróleo con TFE menor a 315 °C, sin embargo, también se aplica a hidrocarburos con TFE mayor a 315 °C, aunque la precisión no está determinada [10, 11]. El color también es una limitante para dicho método.

De las muestras utilizadas para el desarrollo de la correlación la gran mayoría presentó TFE mayor a 315 °C (querosina y diesel), y sólo algunas tuvieron TFE menor a 315 °C (turbosina). El color ASTM de los destilados intermedios no interfirió en el resultado de la concentración de aromáticos por el método FIA, ya que éstos presentaron valores menores a 1.

Para confirmar la aplicabilidad de la correlación, se analizaron otros destilados intermedios vírgenes e hidrotrata-

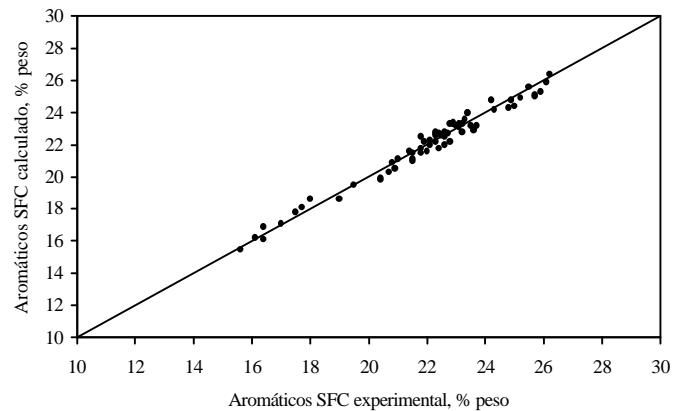


Fig. 2. Comparación del contenido de aromáticos por el método SFC experimentales y calculados.

dos, con un intervalo de color ASTM entre 0.5 y 2.0, cuyas concentraciones de aromáticos (FIA y SFC) se presentan en la Tabla 4.

Aplicando la ecuación (3) se determinaron los valores teóricos de aromáticos en % peso, los que se compararon con los valores experimentales, encontrándose un error absoluto promedio de 1.67 %, el cual se encuentra dentro del margen de error encontrado en el análisis de 180 muestras. La diferencia máxima absoluta entre los valores experimentales y calculados fue 0.71 % peso.

Con estos resultados se confirma que la correlación es adecuada para estimar el contenido de aromáticos por el método SFC, a partir de los datos obtenidos por el método FIA para destilados intermedios dentro de un intervalo de color ASTM de 0.5 a 2.

Aunque el método FIA se recomienda sólo para muestras con TFE menor a 315 °C, se observó que para los destilados empleados en el desarrollo de la ecuación (3) no se tuvieron problemas de color y de viscosidad con TFE de 365 °C, por lo

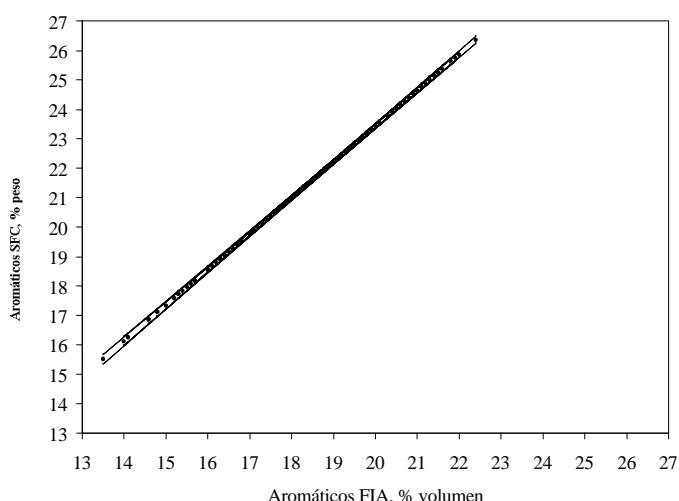


Fig. 3. Intervalo de confianza de la correlación entre contenidos de aromáticos por los métodos FIA y SFC.

Tabla 4. Aromáticos en destilados intermedios y en combustible diesel.

Muestras	Experimental FIA, % vol.	SFC, % peso	Calculado SFC, % peso	Diferencia % peso	Error, %
Diesel primario 1	24.60	28.32	28.97	-0.65	-2.29
Diesel primario 2	26.20	30.39	30.88	-0.49	-1.61
Diesel primario 3	26.40	31.70	31.12	0.58	1.83
Diesel comercial 1	22.80	26.10	26.81	-0.71	-2.72
Diesel comercial 2	22.60	26.07	26.57	-0.50	-1.91
Diesel hidrogenado	20.43	23.90	23.97	-0.07	-0.29
Diesel hidrodesulfurado	22.90	26.24	26.93	-0.69	-2.62
Querosina primaria 1	21.08	24.35	24.75	-0.40	1.64
Querosina primaria 2	22.30	25.93	26.21	-0.28	-1.08
Turbosina primaria 1	17.03	20.35	19.90	0.45	2.21
Turbosina primaria 2	17.59	20.62	20.57	0.05	0.24

Tabla 5. Datos de contenidos de aromáticos reportados de literatura [17].

Muestras	Aromáticos FIA % vol.	Aromáticos SFC determinados en diferentes laboratorios, % peso				Valor mínimo	Valor máximo	Aromáticos SFC calculados % peso
		Lab. 1	Lab. 2	Lab. 3	Lab. 4			
1	18.9	20.5	22.8	20.5	19.1	19.1	22.8	22.14
2	19.7	21.2	22.3	20.6	19.3	19.3	22.3	23.10
3	41.6	42.4	46.2	40.0	39.8	39.8	46.2	49.33
4	13.5	17.0	18.1	17.3	15.1	15.1	18.1	15.67
5	32.1	36.1	38.2	34.2	33.1	33.1	38.2	37.95
6	22.8	25.2	26.8	24.7	22.6	22.6	26.8	26.80

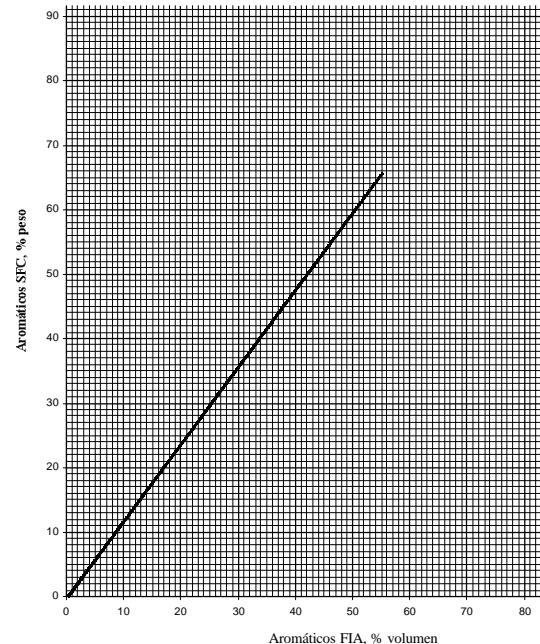
que al parecer la TFE no afecta los resultados siempre y cuando el color ASTM no sea mayor a 2.

En la Fig. 3 se observan los intervalos de confianza de la regresión lineal simple y los resultados obtenidos con la correlación, los cuales no están alejados de la línea de regresión, por lo que se confirma la correlación mejor.

Aplicación de la correlación a datos reportados en la literatura

Existen algunos reportes en la literatura sobre resultados de concentración de aromáticos obtenidos con los métodos FIA y SFC para turbosinas y combustibles diesel provenientes de crudos canadienses, los cuales se resumen en la Tabla 5 [17]. El análisis de aromáticos de cada muestra por el método FIA se determinó una sola vez, mientras que el contenido de aromáticos por el método SFC se realizó en cuatro laboratorios diferentes. De esta tabla se observa que los valores de aromáticos por SFC varían para cada laboratorio presentando diferencias entre 3 y 6.4 % peso.

Con los datos de aromáticos por el método FIA se utilizó la correlación desarrollada en este trabajo y se calcularon los contenidos de aromáticos por el método SFC. Los resultados se muestran en la última columna de la Tabla 5, los cuales caen dentro del intervalo de valores experimentales reportados. Esto implica que la correlación también predice ade-

**Fig. 4.** Correlación entre contenidos de aromáticos por los métodos FIA y SFC.

cuadamente los aromáticos por SFC para muestras provenientes de otros crudos diferentes a los utilizados en el desarrollo de la misma.

Con estos resultados se confirma nuevamente la bondad en las predicciones de la correlación propuesta.

Para facilitar los cálculos, en la Fig. 4 se presenta esta correlación de manera gráfica con la que se pueden determinar directamente las concentraciones de aromáticos por los métodos FIA y SFC, conociendo una de las dos.

Cabe mencionar que el método SFC es muy confiable para concentraciones de aromáticos superiores a 10 % peso. Para valores menores a 10 % peso se tiene una incompleta separación de los compuestos saturados y aromáticos, originando que la medición del contenido de aromáticos tienda a ser mayor que el valor verdadero. El error relativo se incrementa progresivamente conforme decrece la concentración de aromáticos [18]. Lo anterior no se pudo demostrar en este trabajo, ya que las muestras analizadas presentaron concentraciones de aromáticos mayores a 10 % peso.

Conclusiones

Se obtuvo una correlación lineal entre la concentración de aromáticos de destilados intermedios obtenida mediante los métodos ASTM D-1319 (FIA) y ASTM D-5186 (SFC), la cual presentó un error promedio de 2.3 % con referencia a los datos experimentales.

La correlación se validó con datos de concentraciones de aromáticos de muestras que no se usaron para el desarrollo de la misma, encontrándose diferencias entre los valores calculados y los experimentales menores a 0.71 % peso. Con el cálculo de los intervalos de confianza se confirmó que la correlación obtenida es adecuada y que se presentan desviaciones pequeñas para la determinación del contenido de aromáticos.

La correlación también se utilizó con contenidos de aromáticos reportados en la literatura, de muestras de destilados provenientes de crudos diferentes a los utilizados para su desarrollo y los valores obtenidos fueron muy cercanos a los valores experimentales.

Es preferible que las muestras de hidrocarburos tengan color ASTM menor que 2 para obtener resultados experimentales de contenido de aromáticos más confiables mediante el método FIA.

Referencias

- Riazi, M. R.; Nasimi, N.; Roomi, Y. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1999**, 38, 4507-4512.
- Al-Blwhed, M. S.; Sayyouh, M. H.; Desouky, S. M. *Petr. Eng. Int.* June **1993**, 56-60.
- Goossens, A. G. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1996**, 35, 985-988.
- Riazi, M. R.; Mansoori, G. *Oil & Gas J.* June 12, **1993**, 108-111.
- Edalar, M.; Bozar-Jomehari, R. B. *Oil & Gas J.* Feb. 1, **1993**, 39-40.
- Semwal, P. B.; Varshney, R. G. *Oil & Gas J.* June 6, **1994**, 89-91.
- Shiflett, W.; Dicamillo, D.; Remans, T. Paper presented at the NPRA 2000 Annual Meeting, 26-28 March, San Antonio, TX., **2000**.
- Hunter, M.; Gentry, A.; Lee, S.; Lucas, Olivier, C.; Pappal, D. Paper presented at the NPRA 2000 Annual Meeting, 26-28 March, San Antonio, TX., **2000**.
- Marroquín, G.; Ancheyta, J. *Appl. Catal. A.* **2001**, 207, 407-409.
- Heinze, P.; Betts, W. E.; Booth, M.; Gadd, P.; Giavazzi, F.; Guttman, H.; Hall, D. E.; Mayers, R. F.; Mercogliano, R.; Hutcheson, R. C. CONCAWE Report No. 94/58, **1994**.
- ASTM D-1319-99, "Standard test method for hydrocarbon types in liquid petroleum products by fluorescent indicator adsorption", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 05.01, **2000**.
- Lee, S. L.; Win, M.; Desal, P. H.; Johnson, C. C.; Asim, M. Y. *Fuel Reformulation*, May / June 12, **1992**, 26-31.
- ASTM D-5186-99, "Standard test method for determination of the aromatic content and polynuclear aromatic content of diesel fuels and aviation turbine fuels by supercritical fluid chromatography", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 05.03, **2000**.
- Nash, R. M. *Oil & Gas J.* May. 29, **1989**, 47-56.
- Santana, G. E. Tipos de aromáticos en destilados intermedios del petróleo, Tesis de licenciatura, ESIQIE-IPN, México, **2000**.
- Montgomery, D. C. *Diseño y Análisis de Experimentos*, Ed. Iberoamérica, México, **1991**, 429-446, 540, 542-546.
- Lee, S. W. *J. Liq. Chromatogr.* **1990**, 13, 3221-3224.
- Di Sanzo, F. P.; Poder, R. E. *J. Chromatogr. Sci.* **1991**, 29, 6.