

**APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE COMPATIBILIDAD PARA MEJORAR
LOS ESQUEMAS DE ALMACENAMIENTO DE CRUDOS**

**DAYANA ROCÍO FIGUEROA MONCADA
MÓNICA ROCÍO RAMÍREZ HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006

**APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE COMPATIBILIDAD PARA MEJORAR
LOS ESQUEMAS DE ALMACENAMIENTO DE CRUDOS**

**DAYANA ROCÍO FIGUEROA MONCADA
MÓNICA ROCÍO RAMÍREZ HERNÁNDEZ**

**Trabajo de Grado como requisito para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR - UIS
CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA
M. Sc INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR - ICP
CARLOS ALBERTO BALDRICH FERRER
M. Sc QUÍMICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2006

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	3
1.1 CLASIFICACIÓN DE CRUDOS	3
1.1.1 Según sus componentes	3
1.1.2 Según la Gravedad API	4
1.1.3 Según la constante Viscosidad – Gravedad	4
1.2 ASFALTENOS	5
1.2.1 Estructura	5
1.2.2 Propiedades coloidales	6
1.3 PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS	7
1.4 PARÁMETROS DE ESTABILIDAD	8
1.5 CRITERIOS DE COMPATIBILIDAD DE MEZCLAS DE CRUDOS	9
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	10
2.1 SELECCIÓN DE CRUDOS	10
2.1.1 Manejo de los crudos	11
2.2 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS	12
2.3 MICROSCOPIA	12
2.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD PARA CRUDOS Y MEZCLAS	13
2.4.1 Método Manual	13
2.4.1.1 Índice de Refracción	14
2.4.2 Muestras con bajo contenido de asfaltenos	15
2.4.3 Método Automático (P – VALUE, Po/FRmax)	16
2.5 PREPARACIÓN DE MEZCLAS	17

2.6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD PARA MEZCLAS	18
2.7 CÁLCULO DEL INTERVALO DE COMPATIBILIDAD ENTRE CRUDOS	19
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	20
3.1 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS	20
3.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE CRUDOS	24
3.2.1 Método Manual	24
3.2.2 Método Automático	27
3.2.2.1 P – Value.	27
3.2.2.2 Po / FRmax.	27
3.3 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS	28
3.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE MEZCLAS.	29
3.4.1 Método Manual.	29
3.5 CÁLCULO DE LOS INTERVALOS DE COMPATIBILIDAD	31
CONCLUSIONES	33
BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS	38

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Clasificación de Crudos según Composición	4
Tabla 2. Clasificación de Crudos según Gravedad API	4
Tabla 3. Definición de los intervalos de estabilidad	8
Tabla 4. Crudos empleados en el estudio	11
Tabla 5. Análisis Físicoquímicos	12
Tabla 6. Parámetros de Heithaus	14
Tabla 7. Método automático	16
Tabla 8. Caracterización Físicoquímica	20
Tabla 9. Comparación Heithaus – Po/FRmax	28
Tabla 10. Parámetros de Estabilidad Método Manual	29
Tabla 11. Intervalos de Compatibilidad.	31
Tabla 12. Serie asignada a los crudos figura 6	38
Tabla 13. Serie asignada a los crudos figura 7	38
Tabla 14. Componentes de las mezclas preparadas	38
Tabla 15. Resultados Índice de Refracción Crudo Mz Ayacucho	51
Tabla 16. Resultados Índice de Refracción Crudo Calypso	51
Tabla 17. Resultados Índice de Refracción Crudo Caño Limón	52
Tabla 18. Resultados Índice de Refracción Crudo Mz OAM	52
Tabla 19. Resultados Índice de Refracción Crudo Mz OCLL	53
Tabla 20. Resultados Índice de Refracción Crudo OMIMEX	53
Tabla 21. Resultados Índice de Refracción Crudo RUBIALES	54
Tabla 22. Resultados Índice de Refracción Crudo SOUTHBLEND	54
Tabla 23. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 1	55
Tabla 24. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 2	55
Tabla 25. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 3	56

Tabla 26. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 4	56
Tabla 27. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 5	57
Tabla 28. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 6	57
Tabla 29. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 13	58
Tabla 30. Resultados Índice de Refracción MEZCLA 21	58
Tabla 31. Destilación Simulada de Crudos	59
Tabla 32. Destilación Simulada de Mezclas	60
Tabla 33. Caracterización De Mezclas	61
Tabla 34. Agrupación 1	68
Tabla 35. Agrupación 2	68
Tabla 36. Agrupación 3	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Modelo de floculación de asfaltenos	7
Figura 2. Modelo Irwin Wiehe	7
Figura 3. Metodología Experimental	10
Figura 4. Línea de Estabilidad	14
Figura 5. Destilaciones Simuladas Crudos	24
Figura 6. Parámetros de Estabilidad Método Manual	25
Figura 7. Reserva de Estabilidad por Heithaus e Índice de Refracción	26
Figura 8. Parámetro de Estabilidad Método Automático	27
Figura 9. Crudo ABO	41
Figura 10. Crudo Mezcla Ayacucho	41
Figura 11. Crudo Mz Ayacucho (Mz 9)	42
Figura 12. Crudo Calypso	42
Figura 13. Crudo Cusiana	43
Figura 14. Crudo Caño Limón	43
Figura 15. Crudo Mezcla OAM	44
Figura 16. Crudo Mezcla OCLL	45
Figura 17. Crudo Mezcla ODC	45
Figura 18. Crudo OMIMEX	46
Figura 19. Crudo Rubiales	47
Figura 20. Crudo SCRAVOS	47
Figura 21. Crudo SOUTHBLEND	48
Figura 22. Mezclas Inestables	49
Figura 23. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo Mz Ayacucho	51

Figura 24. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo Calypso	51
Figura 25. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo Caño Limón	52
Figura 26. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo OAM	52
Figura 27. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo OCLL	53
Figura 28. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de crudo Crudos Omimex	53
Figura 29. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo Rubiales	54
Figura 30. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo Southblend	54
Figura 31. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 1	55
Figura 32. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 2	55
Figura 33. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 3	56
Figura 34. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 4	56
Figura 35. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 5	57
Figura 36. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 6	57
Figura 37. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 13	58
Figura 38. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mezcla 21	58
Figura 39. Parámetros de Estabilidad para todas las muestras	69
Figura 40. Parámetros de Estabilidad Grupo 1	70
Figura 41. Parámetros de Estabilidad Grupo 2	71
Figura 42. Parámetros de Estabilidad Grupo 3	72

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Nomenclatura de crudos y mezclas	38
ANEXO B. Evaluación de crudos y mezclas de crudos por microscopía y cromatografía en papel	40
ANEXO C. Índice de Refracción	50
ANEXO D. Caracterización de Mezclas y destilaciones simuladas de crudos y mezclas	59

TITULO

APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE COMPATIBILIDAD PARA MEJORAR LOS ESQUEMAS DE ALMACENAMIENTO DE CRUDOS

AUTORES

DAYANA ROCÍO FIGUEROA MONCADA
MÓNICA ROCÍO RAMÍREZ HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES

Asfaltenos, mezcla estable, precipitación de asfaltenos, parámetros de estabilidad, intervalos de compatibilidad

DESCRIPCIÓN

Actualmente en las refinerías de ECOPETROL S.A los crudos se procesan en forma planeada utilizando como parámetros las propiedades del crudo ($^{\circ}$ API, Número ácido y azufre) buscando mantener estables las condiciones de operación en las unidades de crudos y demás unidades de proceso de las refinerías. Sin embargo, debido a los problemas de precipitación de asfaltenos que se pueden presentar al mezclar crudos, es necesaria la evaluación de los parámetros de estabilidad en las mezclas típicas de la refinería de Cartagena para evaluar la criticidad de la estabilidad de mezclas en la operación y generar recomendaciones para minimizar problemas de operación en tanques de almacenamiento, torres de destilación, intercambiadores de calor, que se traducen en pérdidas económicas debido a periodos de paralización del trabajo por reemplazo de equipos y retrasos en la producción.

En la presente investigación se evaluaron trece crudos y se prepararon mezclas de ellos en el laboratorio que fueron caracterizadas por pruebas estándar. Los parámetros de estabilidad fueron realizados por métodos manual y automático. Los intervalos de compatibilidad de las mezclas fueron determinados a partir de los parámetros de los componentes individuales de éstas, encontrándose que las mezclas típicas que se cargan a la refinería son compatibles en todas las proporciones volumétricas, sin embargo cuando crudos importados entran a formar parte de la dieta se pueden presentar problemas de precipitación de asfaltenos dependiendo del grado de estabilidad de los crudos que lo acompañen.

En un primer intento por correlacionar los parámetros obtenidos experimentalmente y los análisis fisicoquímicos realizados a los crudos, se construyeron modelos de calibración, los cuales indican la necesidad de efectuar más análisis fisicoquímicos para obtener modelos de calibración y validación con mayor estabilidad, de tal manera que la determinación de los parámetros se pueda realizar a través de un programa y evitar la experimentación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas.
Ingeniería Química.

Director: Crisóstomo Barajas Ferreira.

TITULO

APPLICACION OF THE CRUDE OIL COMPATIBILITY CONCEPT TO IMPROVE THE OF STORAGE SCHEMES OF CRUDES*

AUTHORS

DAYANA ROCÍO FIGUEROA MONCADA
MÓNICA ROCÍO RAMÍREZ HERNÁNDEZ**

KEY WORDS

Asphaltenes, stable mixture, asphaltene precipitation, stability parameters, compatibility intervals.

DESCRIPCIÓN

At this moment the crude oil diet charged to the refineries of ECOPETROL S.A. is planned using its °API, acid number and sulphur content as the main parameters, trying to maintain a stable feedstock that allows a stable operation not only in the crude distillation unit but the others in the refinery.

Nevertheless, due to the precipitation problems of crude asphaltenes precipitation when mixing, it is necessary the evaluation of the parameters of stability in the typical mixtures of the Cartagena Refinery to evaluate how critic could be the stability of mixtures in the operation and to generate recommendations to diminish problems of operation in storage tanks, distillation towers, heat exchangers that could cause economical losses due to non planned periods of maintenance of the units for substitution of process equipment and delays in the production.

For this research were evaluated thirteen crude oils and from them were prepared mixtures in the laboratory. The samples were characterized by standard test procedures. Before any analysis were performed the stability of the samples and mixtures was confirmed by the optical microscopy analysis. The parameters of stability were obtained by both manual and automatic titrations. The compatibility ranges of were determined starting from the parameters before mentioned, establishing that the typical mixtures that are feed to the refinery are compatible in all the volumetric proportions; however, when imported crude oils enter to be a part of the diet there could appear some instability depending on the proportion of these crude oils in the diet.

As a first intent to correlate the parameters obtained experimentally and the physicochemical analysis carried out to the crude oils, calibration models were built, which indicate the necessity to include more samples and physicochemical analysis to obtain calibration and validation models with good estimated predicted in any moment avoiding the experimentation.

* Degree thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas.
Ingeniería Química.

Director: Crisóstomo Barajas Ferreira.

INTRODUCCION

Colombia posee una amplia variedad de crudos que van desde los más livianos como el Cupiagua con una gravedad API de 45 hasta los extrapesados como el crudo San Fernando con una gravedad de 7. El esquema óptimo de procesamiento de los crudos depende de la naturaleza de estos.

Los crudos se procesan en forma planeada en las refinerías de ECOPETROL S.A., para poder cubrir la demanda de combustibles del país logrando el mayor beneficio económico posible. La Refinería de Barrancabermeja se encuentra adaptada para procesar crudos livianos, medios y pesados mientras que la Refinería de Cartagena procesa principalmente crudos medios.

Los parámetros que se utilizan para efectos de planeación son: las propiedades del crudo (principalmente gravedad API, número ácido y azufre) y sus fracciones de destilación, la localización geográfica del crudo, los costos de transporte y los costos de refinación.

Los crudos de los diferentes yacimientos del país son transportados hacia las refinerías por oleoductos. Una vez llegan a las refinerías se producen mezclas adicionales y luego el crudo se somete a deshidratación antes de iniciar su destilación que es el primer proceso de refinación.

Es sabido que muchos crudos al unirse generan mezclas inestables en las que se produce un precipitado que afecta entre otros la operación de tanques de almacenamiento, sistemas de bombeo, intercambiadores de calor y la eficiencia del proceso de deshidratación (Wiehe, 2000). No obstante en los

esquemas de evaluación disponibles hasta la fecha en nuestro medio, no se incluyen parámetros de estabilidad y de compatibilidad de los crudos.

En un primer intento realizado por ECOPETROL - ICP (Castro et al., 2004) se establecieron procedimientos para determinar parámetros de estabilidad de crudos y se aplicaron a mezclas muy reducidas mostrando la utilidad de tener en cuenta este parámetro en la planeación de las dietas de los crudos a las refinerías.

Este trabajo pretende evaluar el comportamiento de las cargas utilizadas típicamente en la Refinería de Cartagena para determinar la criticidad de la estabilidad de las mezclas que se procesan y generar recomendaciones para minimizar problemas de este tipo. Se introducen adicionalmente nuevos conceptos analíticos para tratar de predecir la estabilidad de un crudo a partir de su composición química.

De esta manera se realizaron 40 mezclas que oscilan entre 28 – 33 ° API, con una cantidad de azufre entre 0,4 – 1%; con 13 crudos provenientes principalmente de las líneas Vasconia y Ayacucho y de las importaciones que se realizan. Las mezclas fueron analizadas mediante métodos de titulación dependiendo de sus características, para encontrar los parámetros de estabilidad y calcular los intervalos de compatibilidad.

1. FUNDAMENTO TEORICO

Los crudos son una mezcla compleja constituida por diferentes compuestos mayoritariamente hidrocarbonados (84 %C y 14% Hidrógeno), cantidades menores de Nitrógeno, Oxígeno y Azufre y pequeñas trazas de metales (Na, Ni, V, Fe y Ca) que varían de acuerdo a la localización, la edad del campo, los cambios químicos y físicos impartidos y la profundidad (Castro et al, 2004; Alayon, 2004; Speight, 2001).

Los crudos difieren ampliamente en apariencia, viscosidad, olor y color de acuerdo a las condiciones de pozo. Las diferencias en las propiedades, especialmente en cuanto a estructura molecular los hacen más o menos sencillos de transportar y procesar, clasificándolos de acuerdo a la naturaleza de los compuestos hidrocarbonados, la proporción en que se encuentran los materiales volátiles en el crudo y los contenidos de otras moléculas especialmente azufre junto con la reactividad de ellos.

1.1 CLASIFICACION DE CRUDOS

1.1.1 Según sus componentes.

- **Crudos de base parafínica.** Son hidrocarburos con cadenas lineales o ramificadas sin estructuras de anillo. En las fracciones livianas y las ceras son de cadena recta y en las fracciones pesadas son ramificadas.

- **Crudos de base asfáltica o nafténicos.** Son hidrocarburos saturados con uno o más anillos cada uno, los cuales pueden tener una o más cadenas laterales parafínicas. Se conocen como hidrocarburos alicíclicos o cicloparafínicos.

- **Crudos Aromáticos.** Son aquellos que contienen uno o más anillos aromáticos que pueden sustituirse con anillos nafténicos y/o cadenas laterales parafínicas.

- **Crudos de base mixta.** Compuestos por estructuras de carácter parafínico, de carácter nafténico y bajas concentraciones de anillos aromáticos proporcionándole al crudo características propias de cada fracción.

Pueden ser agrupados de acuerdo a la cantidad relativa de estos componentes como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los crudos según su composición

Crudos Parafínicos	Parafinas + Naftenos > 50%	Parafinas > Naftenos	Parafinas > 40%
Crudos Nafténicos	Parafinas + Naftenos > 50%	Naftenos > Parafinas	Naftenos > 40%
Crudos Parafínico - Nafténicos	Aromáticos < 50%	Parafinas < 40%	Naftenos < 40%
Crudos Aromático - Nafténicos	Aromáticos > 50%	Naftenos > 25%	Parafinas < 10%
Crudos Aromático - Intermedios	Aromáticos > 50%	Parafinas > 10%	
Crudos Aromático - Asfálticos	Naftenos > 25%	Parafinas < 10%	

1.1.2 Según la Gravedad API (°API)

Tabla 2. Clasificación de Crudos según Gravedad API

Crudo	Densidad (g/ cm ³)	°API
Extrapesado	>1,000	<10,0
Pesado	1,000 – 0,934	10,0 – 20,0
Mediano	0,934 – 0,8762	20,0 – 30,0
Liviano	< 0,8762	> 30,0

1.1.3 Según la constante Viscosidad – Gravedad

Utilizada para indicar la composición predominantemente parafínica o cíclica de un crudo (Speight, 2001). Se define como

$$VGC = (10 \cdot SG - 1.0752 \cdot \log(V_{100F} - 38)) / (10 - \log(V_{100F} - 38)) \quad (1)$$

Donde: V_{100F} es la constante de viscosidad de Saybolt a 100°F

SG es la gravedad específica a 60°/60°F

Un crudo se considera parafínico, nafténico ó aromático cuando los valores de VGC varía entre 0,74 – 0,75; 0,89 – 0,95; 0,95 – 1,13 respectivamente.

1.2 ASFALTENOS

Los asfaltenos son altamente polares, de elevado peso molecular, y estructura compleja, se cree que tienen una carga eléctrica y están constituido por cicloparafinas, e hidrocarburos aromáticos condensados de grandes pesos moleculares que le dan su polaridad debido a las diferentes proporciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y constituyentes metálicos (Ni, V, Fe) en sus moléculas (Alayon, 2004)

La cantidad de asfaltenos en el petróleo varía con la fuente, la profundidad, la gravedad API, y el contenido de sulfuros, teniendo una gran influencia en la calidad del crudo.

Se definen según su solubilidad (Sunil et al, 1995) como la fracción del crudo que precipita en alcanos livianos como pentano, hexano o heptano y se solubiliza en solventes como cloroformo, tolueno, benceno, disulfuro de carbono, etc.

1.2.1 Estructura. Buscando entender un poco más la estructura molecular de los asfaltenos se han realizado investigaciones basadas en métodos físicos y químicos con las que se ha podido concluir que los asfaltenos son núcleos aromáticos condensados los cuales llevan sistemas alquil y alicíclicos con heteroátomos dispersos y se sugiere que al incrementarse el peso molecular, la aromaticidad y la proporción de heteroátomos aumenta. La estructura de las moléculas de asfaltenos muestra también, que son

hidrocarburos con partes relativamente polares dadas por los anillos aromáticos y los grupos funcionales y partes apolares constituidas por las cadenas alifáticas; lo cual permite presentar una dualidad polar-apolar dándole propiedades interfaciales. (Castro et al, 2004; Alayon, 2004; Sunil 1995).

1.2.2 Propiedades coloidales. Se explican mediante diversos modelos termodinámicos que tratan de interpretar el comportamiento y la forma como están presentes los asfaltenos en el crudo, y que a la vez funcionan como herramientas predictivas de la precipitación de asfaltenos. En estos modelos (figura 1) las resinas son consideradas como agentes peptizantes, es decir, se adsorben rodeando a los agregados de asfaltenos, permitiendo un equilibrio molecular con el resto de los componentes del crudo (A). Los cambios en las condiciones de presión, temperatura, composición u otra variable relevante, hacen que las resinas que se encuentran adsorbidas a la superficie de los asfaltenos, se transfieran a la fase líquida (B), por lo que los asfaltenos al quedar desprotegidos pueden agregarse y eventualmente flocular (C – D).

Recientemente, Irwin Wiehe propuso otro modelo (compatibilidad de aceites) como se muestra en la figura 2. En éste, los asfaltenos son dispersados en el aceite por las resinas y esta dispersión es disuelta por los compuestos aromáticos del aceite. Así, los asfaltenos son mantenidos en solución en el petróleo por un equilibrio termodinámico que se puede trastornar fácilmente agregando compuestos saturados como n- pentano o n- heptano que causan la separación de las resinas, o mezclando crudos de diferentes fuentes durante el proceso de refinación, presentándose una floculación y precipitación irreversible de los asfaltenos: Mousavi (2004).

Figura 1. Modelo de floculación de asfaltenos

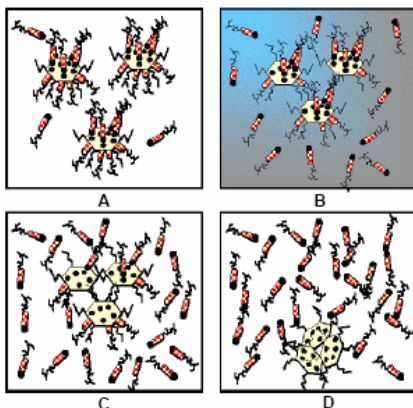


Figura 2. Modelo Irwin Wiehe



1.3 PRECIPITACIÓN DE ASFALTENOS

Los parámetros que gobiernan la agregación y precipitación de asfaltenos son las condiciones del solvente, la relación precipitante/muestra, el tipo de precipitante, la presión y la temperatura (Alayon, 2004; Sunil, 1995). Por ejemplo, la adición de componentes parafínicos como n - pentano y n - heptano disminuyen el poder de solubilidad incrementándose la probabilidad de los asfaltenos a auto agregarse; con el n - pentano coprecipitarán resinas de alto y asfaltenos de bajo peso molecular que con n - heptano se mantendrán en solución, por lo tanto, los asfaltenos precipitados con n - heptano y solventes más pesados tendrán en promedio mayor peso molecular, menor relación atómica H/C, serán más polares y, por lo tanto, más insolubles.

En cuanto a la temperatura, un incremento en ella generalmente afectará la agregación de los asfaltenos por un aumento en el poder de solubilidad del crudo, aunque en algunos casos la precipitación puede aumentar con la temperatura cuando se llega a condiciones de craqueo térmico de 425 °C: Sunil (1995)

1.4 PARÁMETROS DE ESTABILIDAD

Para determinar la estabilidad de un crudo y una mezcla de crudos, poder establecer el orden correcto y las proporciones de mezclado de ellos y prevenir los problemas ocasionados por la precipitación de asfaltenos, es necesario evaluar dos parámetros: El poder de solvencia disponible (PS), que es una medida de la solvencia de los maltenos para los asfaltenos y depende de las características químicas de esta fase aceitosa y el número de insolubilidad o poder de solvencia requerido por los asfaltenos para mantenerse disueltos (PI), el cual depende de la naturaleza química de los asfaltenos y de las resinas asociadas a estos.

Con estos dos parámetros, se obtiene la reserva de estabilidad de un hidrocarburo dada por la relación entre los parámetros *PS* y *PI*. Definiendo cuatro intervalos de estabilidad (Castro et al, 2004).

Tabla 3. Definición de los intervalos de estabilidad

criterio	Intervalo
Muy Estable	$P \geq 2$
Estable	$1,25 < P < 2$
Críticamente Estable	$1 \leq P \leq 1,25$
Inestable	$P < 1$

Cuando un producto es *estable*, los asfaltenos presentes se encuentran suspendidos homogéneamente en la fase líquida; de lo contrario será *Inestable* y los asfaltenos se aglomerarán y precipitarán.

El cálculo de los parámetros de estabilidad para los crudos y las mezclas de ellos se presenta en la sección 2.4

1.5 CRITERIOS DE COMPATIBILIDAD DE MEZCLAS DE CRUDOS

Una mezcla de crudos se considera compatible si el poder de solvencia disponible de la mezcla es mayor que el mayor poder de solvencia requerido de la mezcla, es decir,

$$PS_{mix} > PI_{mayor} \quad (2)$$

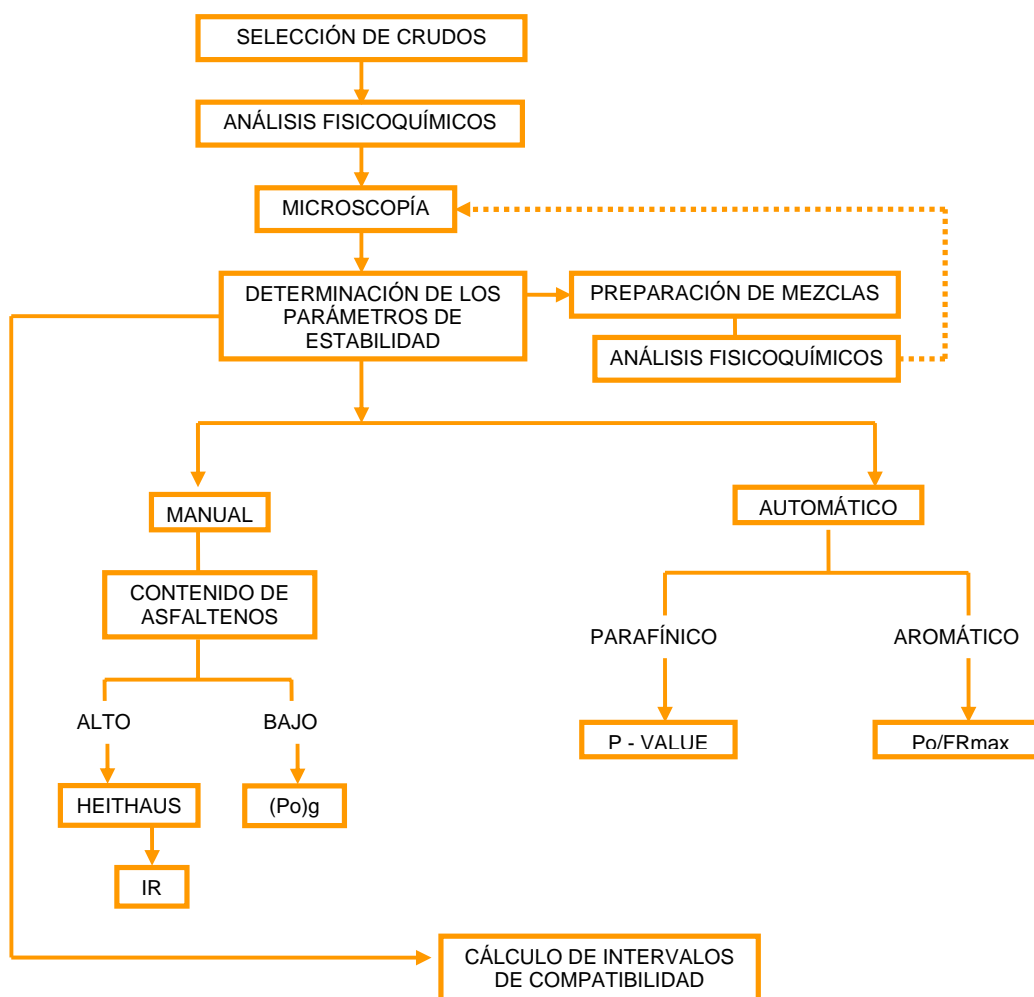
Si estos dos parámetros son iguales la mezcla es críticamente compatible. Se dice entonces que hay compatibilidad si no se presenta precipitación de asfaltenos e incompatibilidad si se presenta precipitación de asfaltenos al mezclar los crudos. (Castro et al., 2004; Wiehe 1999)

Algunos estudios han mostrado que al mezclar crudos diferentes (inicialmente estables) se puede generar precipitación de asfaltenos por órdenes de mezclado o proporciones de mezclado incorrectas. Aunque también se ha encontrado el efecto contrario en el que un crudo inestable no presente problemas de precipitación cuando es mezclado con otro ya que al ser mezclado se previene la precipitación lo que indica que el primer crudo actúo como agente protector y un estabilizador de los asfaltenos.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En esta sección se presentaran cada una de las etapas desarrolladas en la ejecución de este trabajo, con su respectiva explicación.

Figura 3. Metodología Experimental



2.1 SELECCIÓN DE CRUDOS

Para la realización del estudio se seleccionaron crudos empleados en la dieta de GRC, puesto que ésta refinería maneja un sistema de alimentación mas sencillo que GCB.

Como se indica en la tabla 4 dentro de los crudos escogidos se presentan crudos nacionales e importados de igual forma crudos livianos, medios y pesados.

Tabla 4. Crudos empleados en el estudio.

Crudo	Nacional	Importado	°API	Fecha de muestreo
ABO		X	39,1	20 de Abril de 2005
Mz Ayacucho	X		33,1	9 de Noviembre de 2005
Mz Ayacucho (Mz 9) ¹	X		19,5	
Calypso		X	29,1	15 de Marzo de 2005
Caño Limón	X		28,7	11 de Octubre de 2005
Cusiana	X		43,7	20 de Octubre de 2005
Mz OAM	X		24,1	1 de Octubre de 2005
Mz OCLL	X		21,8	02 de Octubre de 2005
Mz ODC	X		23,9	25 de Octubre de 2005
Mz OMIMEX	X		19,2	12 de Noviembre de 2005
Rubiales			12,8	03 de Junio de 2004
Scravos		X	31,3	30 de Diciembre de 2005
Southblend	X		28,6	30 de Agosto de 2005

2.1.1 Manejo de los crudos. Durante el periodo en que se realizó la experimentación los crudos se mantuvieron en refrigeración en un cuarto frío a 12 °C garantizando así que no hubiera pérdida de livianos.

- Antes de empezar los análisis las muestras se retiraron del cuarto frío y se dejaron reposar a temperatura ambiente.
- Los crudos con alta cantidad de ceras, la cual se determinó mediante verificación con gota en papel de filtro y de acuerdo a los análisis fisicoquímicos, se calentaron a 60 °C para disolver los cristales y evitar una falsa precipitación de asfaltenos.

¹ Mezcla de Crudos: Guandó 10%, San Francisco 5%, Castilla 2%, Tello 3%, Galán 5%, Jazmín 11%, Casabe 6%, Rubiales 5%, Teca – Nare 4%, Isla VI 38%, Los ángeles 4%, Santa Lucía 2%, Cicuco 5%.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS

Cada uno de los crudos listados en la tabla 4 fue sometido a una serie de análisis antes de iniciar este estudio con el fin de determinar sus características fisicoquímicas. Los principales análisis y el método utilizado se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis Fisicoquímicos

ANÁLISIS	MÉTODO
Densidad y Gravedad API	ASTM D-5002
Destilación Simulada	ASTM D 5307
Contenido de Insolubles en n-C7	UOP 614
Contenido de Ceras	UOP 46-85
Contenido de Azufre Horiba	ASTM D 4294
Tipo de Carbono Aromáticos	ESPECTROFOTOMETRÍA ULTRAVIOLETA VISIBLE

2.3 MICROSCOPIA

Adicionalmente en la caracterización de los crudos se utilizó el microscopio LEITZ DIAPLAN, en el cual se pueden examinar muestras oscuras. Cuenta con un sistema de calentamiento que permite graduar la temperatura de la placa sobre la que descansa la muestra, observándose el efecto de la temperatura sobre los cristales de ceras y asfaltenos contenidos en la misma. Para esto se capturan imágenes a dos temperaturas 21 y 65 °C.

Esta observación proporciona un conocimiento previo sobre el grado de estabilidad o inestabilidad de la muestra. Cada uno de los crudos y mezclas de crudos fue evaluada en el microscopio. En el anexo B se presentan estas observaciones.

2.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD PARA CRUDOS Y MEZCLAS

Los métodos a utilizar para la determinación de los parámetros de estabilidad se establecieron después de clasificar los crudos y las mezclas. Así, a las muestras estables se les determinaron los parámetros por los métodos manual y automático; mientras que a las muestras inestables, solo se les realizó el método manual puesto que en el automático solo se pueden evaluar muestras estables.

2.4.1 Método Manual. Este método desarrollado por Heithaus consiste en determinar el punto en el cual se presenta la floculación de los asfaltenos de un crudo al adicionar una sustancia parafínica que induzca su precipitación (i- octano) habiéndose agregado previamente una sustancia aromática que los disolviera (o-Xileno).

Para esto se toman tres frascos ámbar de 75 mL en los cuales se pesan 2 ± 0.1 g de muestra; adicionando a cada frasco respectivamente 2, 4 y 6 mL de o – Xileno, se llevan a agitación por 10 min. y posteriormente se utiliza la cromatografía en papel (Anexo B) donde se puede observar la presencia de ceras lo que indica si es necesario un calentamiento de las muestras. A cada uno de los frascos se le va adicionando volúmenes de 1 mL de i-octano hasta el onset, seguidamente se repetirá la titulación con incrementos de 0,1 mL.

Durante el análisis se encuentran los valores:

W = peso de muestra, V_S = Volumen de o-xileno, V_T = Volumen de i-octano, con los cuales se calculan los parámetros: (Castro et al, 2004)

RELACIÓN DE FLOCULACIÓN

CONCENTRACIÓN DE DILUCIÓN

$$FR_i = \frac{V_{Si}}{V_{Si} + V_{Ti}} \quad (3)$$

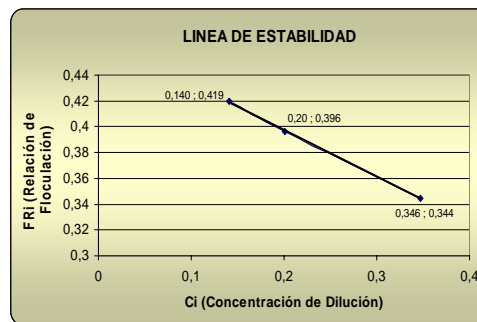
$$C_i = \frac{W_{Oi}}{V_{Si} + V_{Ti}} \quad (4)$$

Al graficarse C_i vs FR_i se obtiene la línea de estabilidad de la muestra y se calculan los parámetros que se muestran a continuación.

Tabla 6. Parámetros de Heithaus

PARÁMETRO	EXPRESIÓN
- Peptizabilidad de los asfaltenos (P_a)	$P_a = 1 - FR_{max}$
- Poder de solvencia disponible de un crudo (PS)	$PS = FR_{max} * \frac{1}{C_{min}} + 1$
- Reserva de estabilidad de un crudo (P)	$P = \frac{P_o}{1 - P_a}$
- Poder de Solvencia requerido por los asfaltenos (PI)	$PI = FR_{max}$

Figura 4. Línea de Estabilidad



A cada una de las muestras se le realiza ésta titulación dos veces para determinar la repetibilidad de los datos. El parámetro P hallado durante la titulación es importante dentro del cálculo de los intervalos de compatibilidad.

2.4.1.1 Índice de Refracción ASTM D1218 – 92. Esta técnica se utilizó como herramienta auxiliar en la detección de la precipitación de asfaltenos, con la cual se esperaba comprobar la utilidad del Índice de Refracción para caracterizar muestras y observar su comportamiento durante la titulación, haciendo un seguimiento en cada adición de i-octano.

Al realizar la cromatografía en papel se transfieren como mínimo 0.5 mL de muestra a la superficie del prisma del refractómetro METLER TOLEDO RD40 (anexo C) tan pronto como sea posible, se cubre la muestra para prevenir la evaporación, se espera a que haya un equilibrio de la temperatura y se lee el registro inicial estabilizado de Índice de Refracción. Con el tiempo, éste parámetro puede variar para éstas mezclas debido a los asfaltenos absorbidos y/o depositados en la superficie del prisma, así que es importante tomar la lectura inicial estabilizada.

Las mediciones se realizaron a 20°C y con lámpara de Sodio, cabe resaltar que la muestra debe estar libre de sólidos suspendidos, agua, u otros materiales que puedan afectar la lectura.

2.4.2 Muestras con bajo contenido de asfaltenos (SMS 2527 -94). La determinación del parámetro de estabilidad para crudos con bajo contenido de asfaltenos también consiste en una titulación, pero en este caso se utiliza una solución estándar al 1% m/m rica en asfaltenos. La preparación de ésta solución se hace de acuerdo a la norma. Una vez obtenida dicha solución se procede a titularla, para esto se requieren tres porciones de muestra de 2 ± 0.1 g, a cada una de ellos se le adiciona 1, 2 y 3 mL de cetano respectivamente y se llevan a agitación por media hora; cumplido el tiempo se inspecciona en el microscopio LEICA GALLEN III si ha ocurrido precipitación de asfaltenos. Una vez obtenido el volumen máximo requerido para que no haya precipitación se repite la titulación con incrementos de 0,1 mL.

La titulación de la muestra problema se realiza repitiendo los pasos anteriores pero en lugar del cetano se utiliza el crudo a analizar, el máximo volumen de crudo que se puede adicionar son 3 mL, si en esta cantidad no se presentan pequeñas cadenas marrones de asfaltenos, se debe realizar una mezcla crudo-titulante a una concentración volumétrica entre 2 – 3 y repetir la titulación.

Al terminar el análisis se obtendrán los siguientes valores:

V_1 = Volumen máximo de cetano adicionado a la solución estándar sin causar floculación.

V_2 = Volumen máximo de crudo ó mezcla crudo – titulante adicionado a la solución estándar sin causar floculación.

C = volumen de cetano adicionado por cada mL de muestra (mL titulante/mL de muestra)

Las muestras sin asfaltenos o con muy poca cantidad (<1%) tienen un PI igual a cero.

$$PS = \frac{(1+C)(V_2 - V_1)}{V_2(1+V_1)} * 100 \quad (5)$$

2.4.3 Método Automático (P – VALUE, Po/FRmax). Elaborado por SHELL para medir los parámetros de estabilidad de productos pesados, parafínicos y aromáticos.

La titulación se realiza en un analizador *SHELL ZEMATRA*. Éste consta de dos celdas de reacción de vidrio provistas con capuchas que permiten la adecuación de un sensor óptico (OPTRODE) y un dosificador automático (DOSIMAT), cada una de las celdas tiene chaquetas de calentamiento con las cuales se pueden fijar temperaturas de hasta 150 °C y un sistema de agitación.

El principio de funcionamiento del equipo se basa en la medición de la reflexión de la luz sobre la muestra durante el análisis; la reflexión es transducida a una señal de voltaje permitiendo que el software vaya graficando voltaje vs tiempo, al llegar al onset se presenta un cambio súbito en la pendiente de la señal debido a que al precipitar los asfaltenos forman una capa oscura en el fondo de la celda obstaculizando el paso de la luz. En este momento el programa finaliza proporcionando el valor del parámetro de estabilidad encontrado.

Durante la prueba se va titulando la muestra con volúmenes discretos de cetano en intervalos de tiempo escogido para el análisis, en el caso de la prueba Po/FRmax es necesario realizar mezclas de muestra mas ciertos volúmenes de metil-naftaleno dependiendo de la cantidad pesada antes de llevarla al equipo. Los volúmenes y pesos se especifican a continuación.

Tabla 7. Método automático

MÉTODO	MEZCLA	MUESTRA(g)	VOL. METIL-NAFTELENO	EXPRESIONES
P-Value SMS 1600-01	–	10	–	$P\text{-VALUE} = 1 + X_{MN}^*$
Po/FRmax SMS 2715	A	5	5	$Po = FR_{max} * \frac{1}{C_{min}} + 1$
	B	7	3,5	
	C	7,5	2,5	
	D	9	1,5	

Al realizar la prueba “SMS 1600 – 01” se está determinando la *reserva de estabilidad* de un crudo, donde:

$$X^*_{\min} = \frac{\text{cantidad mínima de cetano para floccular asfaltenos (ml)}}{\text{cantidad de muestra (g)}} \quad (6)$$

En el método “SMS 2715” se mide el *poder de solvencia disponible* de los maltenos de un hidrocarburo, P_o , y el *poder de solvencia requerido* por los asfaltenos del mismo, FR_{max} .

Para obtener estos parámetros se deben diluir cuatro muestras de crudo en los volúmenes de naftaleno mostrados en la tabla 7 seguidamente se realiza la titulación de la siguiente forma

- Titulación gruesa mezclas A y B
- Titulación fina A y B
- Titulación fina C Y D

Al finalizar la titulación el software reporta el valor de los parámetros.

2.5 PREPARACIÓN DE MEZCLAS

Una vez hallados los parámetros de estabilidad (tabla 7) de cada uno de los crudos seleccionados para el estudio, se prepararon mezclas con ellos, con el fin de seguir los porcentajes y componentes típicos que se manejan en **GRC**.

Para la preparación de ellas se agrega el crudo de menor PS sobre el de mayor PS, pues éste debe ser el orden de preparación para que los asfaltenos del crudo que se está agregando encuentren un medio favorable para su disolución.

Las mezclas se prepararon a una temperatura de 40 °C para mejorar la adición y homogenización de la mezcla, se agitaron a 250 rpm durante 10 min. después de la adición de cada crudo y se guardaron en cuarto frío. La

adición de los crudos fue hecha de manera gradual pero no lenta, para evitar la posibilidad de generar inestabilidad por mezclado rápido.

Las proporciones volumétricas de cada uno de los crudos en las mezclas cubrirán todos los rangos con el objetivo de determinar los intervalos en los cuales se presentan compatibilidades e incompatibilidades.

2.6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD PARA MEZCLAS.

El poder de Solvencia Disponible (PS_{mix}), se calcula como un promedio volumétrico entre los PS de los componentes, de acuerdo a la regla de mezcla de parámetros de solubilidad (Castro et al, 2004., Wiehe, 1999).

$$PS_{mix} = \frac{V_1PS_1 + V_2PS_2 + V_3PS_3 + \dots}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots} \quad (7)$$

Donde $PS_{1,2,3\dots}$ representa el poder de solvencia de cada crudo y $V_{1,2,3\dots}$ las fracciones volumétricas.

La determinación del poder de solvencia requerido (PI) para una mezcla de más de 2 crudos, toma la mezcla anterior antes de cada adición de un crudo como un crudo único. Siendo así, para una mezcla de n crudos que:

$$\begin{aligned} \text{Si } PI_{i=n} > P_{mayor_{n-1}} & \text{ entonces } P_{mayor_n} = PI_{i=n} \\ \text{Si } PI_{i=n} < P_{mayor_{n-1}} & \text{ entonces } P_{mayor_n} = P_{mayor_{n-1}} \end{aligned}$$

Donde $PI_{i=n}$ representa el PI del crudo a agregar, $P_{mayor_{n-1}}$ el mayor PI de los crudos ya agregados a la mezcla y P_{mayor_n} el PI de toda la mezcla.

Las mezclas se evaluaron de acuerdo a sus características con los métodos (manual y automático) anteriormente descritos.

2.7 CÁLCULO DEL INTERVALO DE COMPATIBILIDAD ENTRE CRUDOS

Los intervalos de compatibilidad de las mezclas realizadas entre los crudos seleccionados, se establecen mediante las fracciones volumétricas de cada crudo, teniendo en cuenta que la mezcla anterior a cada nueva adición, se tomará como un crudo único con un $PS = PS_{mix_{n-1}}$ a partir de la desigualdad:

$$X_{mix_{n-1}} * PS_{mix_{n-1}} + X_{i=n} * PS_{i=n} \geq PI_{mayor_n} \quad (8)$$

Donde $X_{mix_{n-1}}$ es la fracción volumétrica de la mezcla anterior en la nueva preparación.

Resolviendo:
$$X_{mix_{n-1}} > \frac{PI_{mayor_n} - PS_{i=n}}{PS_{mix_{n-1}} - PS_{i=n}} \quad (9)$$

La concentración crítica (concentración de mínima estabilidad) de una mezcla de crudos se encontrará al calcular las proporciones volumétricas donde PS_{mix} sea igual a PI_{mayor} .

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE CRUDOS

A continuación se presentan los análisis fisicoquímicos realizados a los crudos seleccionados.

Tabla 8. Caracterización Fisicoquímica

PROPIEDAD	UNIDAD	ABO	Mz. Ayacucho	Mz. Ayacucho (Mz9)	Calypso
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,132	0,406	1,448	0,678
DENSIDAD A 15 °C	g/mL	0,829	0,8581	0,9367	0,8806
GRAVEDAD API	°API	39,1	33,3	19,5	29,1
CONTENIDO DE CERAS	% Peso	5,42	14,62	ND	9,81
INSOLUBLES EN n-C7	% Peso	0,10	2,49	ND	1,39
Tabla de Cortes					
IBP- 60.0 NAFTA 1	%Vol	8	1,8	0,4	0,7
60.0- 107.0 NAFTA 2	%Vol	11,2	5,7	2,2	3,1
107.0- 152.0 NAFTA 3	%Vol	12,4	7,3	3	5,2
152.0- 199.0 NAFTA 4	%Vol	10,9	8,6	3,6	7
199.0- 249.0 KERO	%Vol	11,4	9,2	5,4	10,2
249.0- 315.0 ACPM LMANO	%Vol	16,5	14,6	10,2	18,4
315.0- 371.0 ACPM PESADO	%Vol	9,4	11,4	10	15
371.0- 427.0 DEST LMANO	%Vol	7,2	11,2	10,4	12,7
427.0- 482.0 DEST MEDIO	%Vol	6,7	9,9	10,8	10,2
482.0- 565.0 DEST PESADO	%Vol	3,4	9,2	14	7,3
565.0- FBP FONDO VACIO	%Vol	2,9	10,5	29,4	10,2
% RECUPERADO	% Vol	100	89,5	70,6	89,8
UV- VIS					
Monoaromáticos	% Peso	4,212	5,15	5,08	5,39
Diaromáticos	% Peso	2,865	3,27	3,17	2,79
Triaromáticos	% Peso	1,302	2,92	2,89	1,89
Tetraaromáticos	% Peso	0,628	2,85	2,58	1,11
Pentaaromáticos	% Peso	0,298	1,55	1,42	0,56
Hexaaromáticos	% Peso	0,118	0,7	0,63	0,19
Hepta+ aromáticos	% Peso	0,256	2,07	1,94	0,64

ND: No se determinó

Continuación Tabla 8.

PROPIEDAD	UNIDAD	Cusiana	Mz OAM	Mz ODC	Mz OCLL	Caño Limón
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,132	1,116	0,808	1,113	0,462
DENSIDAD A 15°C	gmL	0,8072	0,9091	0,91	0,9225	0,8825
GRAVEDAD API	%API	43,7	24,1	23,9	21,8	28,7
CONTENIDO DE CERAS	% Peso	6,91	8,53	ND	6,81	7,85
INSOLUBLES EN n-C7	% Peso	0,07	3,1	ND	6,86	4,46
Tabla de Cortes						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vd	12,7	1,7	2	1,8	0,4
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vd	11,4	4,1	4,8	4,1	3,4
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vd	11,3	5	5,7	5,6	6,6
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vd	9,3	5,9	5,8	5,4	8,2
199.0 - 249.0 KERO	%Vd	10	7,1	7,7	7,4	9,9
249.0 - 315.0 ACPM LIVIANO	%Vd	14,7	11,7	14	13,6	14,9
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vd	10,2	10,2	12	12,2	11,9
371.0 - 427.0 DEST LIVIANO	%Vd	8,6	9,8	11,3	11,8	10,9
427.0 - 482.0 DEST MEDIO	%Vd	6,1	9,9	9,7	10	9,5
482.0 - 565.0 DEST PESADO	%Vd	4,6	13,4	10,1	11	10,5
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vd	0,6	20,6	16,3	16,3	13,3
% RECUPERADO	% Vd	99,4	79,4	83,7	83,7	86,7
UV - VS						
Monoaromáticos	% Peso	6,05	5,44	5,21	4,88	3,74
Diaromáticos	% Peso	2,94	3,39	3,66	3,61	2,76
Triaromáticos	% Peso	1,49	2,64	3,1	3,13	2,35
Tetraaromáticos	% Peso	0,61	2,18	2,3	2,3	1,75
Pentaaromáticos	% Peso	0,33	1,21	1,35	1,39	1,04
Hexaaromáticos	% Peso	0,12	0,43	0,61	0,6	0,46
Hepta + aromáticos	% Peso	0,39	1,75	2,11	2,37	1,68

Continuación Tabla 8.

PROPIEDAD	UNIDAD	OMIMEX	Rubiales	Scravos	Southblend
AZUFRE HORIBA	% Peso	1,272	1,334	0,374	0,723
DENSIDAD A 15°C	g/mL	0,9387	0,9800	0,8688	0,8836
GRAVEDAD API	°API	19,2	12,8	31,3	28,6
CONTENIDO DE CERAS	% Peso	4,05	3,17	7,89	8,51
INSOLUBLES EN n-C7	% Peso	3,25	10,59	0,92	4,5
Tabla de Cortes					
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	0,3	0	2	2,9
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	2,2	0,1	6,7	6,2
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	3,1	0,1	8,1	7,6
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	3,8	0,1	8,9	7,8
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	5,7	3,6	10,7	8,2
249.0 - 315.0 ACPM LIVIANO	%Vol	11	11,3	17,9	12,5
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	10,4	13,5	11,7	9,8
371.0 - 427.0 DEST LIVIANO	%Vol	10,9	13,8	9,8	9,5
427.0 - 482.0 DEST MEDIO	%Vol	11,1	12,8	9,2	9,2
482.0 - 565.0 DEST PESADO	%Vol	13,9	14,1	6,9	11,3
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vol	27,1	30,4	7,5	15
% RECUPERADO	% Vol	72,9	69,6	92,5	85
UV-VIS					
Monoaromáticos	% Peso	5,32	4,73	5,87	5,1
Diaromáticos	% Peso	3,37	3,00	3,33	3,46
Triaromáticos	% Peso	3,02	3,43	1,67	2,58
Tetraaromáticos	% Peso	2,55	3,27	0,83	1,86
Pentaaromáticos	% Peso	1,35	2,03	0,39	1,06
Hexaaromáticos	% Peso	0,54	0,98	0,15	0,47
Hepta + aromáticos	% Peso	1,72	3,73	0,33	1,53

Los crudos Rubiales, Omimex y Mz Ayacucho (Mz 9) se consideran pesados de acuerdo a su gravedad API; a su vez éstos crudos presentan altos contenidos de azufre, con lo que podría asumirse que están directamente relacionados con la estabilidad coloidal resina – asfalteno, pues altos contenidos de azufre favorecen dicha estabilidad.

Los crudos ABO, Mz Ayacucho, Cusiana y Scravos se clasifican como crudos livianos teniendo a su vez los más bajos contenidos de azufre y de insolubles en n – Heptano.

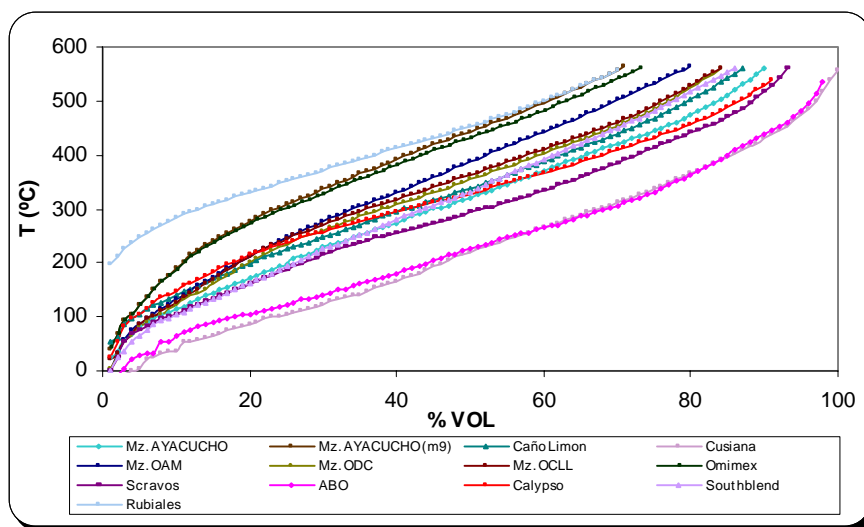
Los crudos Calypso, Mz OAM, Mz ODC, Mz OCLL, Caño Limón y Southblend se consideran crudos medianos de acuerdo a su gravedad API, con valores intermedios de contenidos de azufre.

En las destilaciones simuladas se observa que los crudos ABO, Cusiana y Scravos presentan las mayores proporciones de naftas y Kero lo que representa bajos contenidos de constituyentes asfálticos y confirma su carácter parafínico. Lo contrario ocurre con los crudos Rubiales, Mz Ayacucho (Mz 9) y Omimex que mostraron las menores fracciones volátiles como era de esperarse por su carácter aromático.

En cuanto al contenido de ceras, Los crudos Ayacucho, Calypso y Mz OAM presentaron los mas altos contenidos de ceras y los crudos ABO, Omimex y Rubiales los mas bajos, siendo esto muy importante en la determinación de los parámetros de estabilidad por cromatografía en papel.

Los crudos livianos Cusiana y Scravos presentan los mayores porcentajes de monoaromáticos, sin embargo, al incrementarse el número de anillos esta tendencia no es constante lo que significa que estos crudos presentarán poca reactividad al ser mezclados con otros crudos por la poca presencia de átomos de carbono insaturados en sus moléculas. Caso contrario ocurre con los crudos pesados como Rubiales y Omimex.

Figura 5. Destilaciones Simuladas Crudos



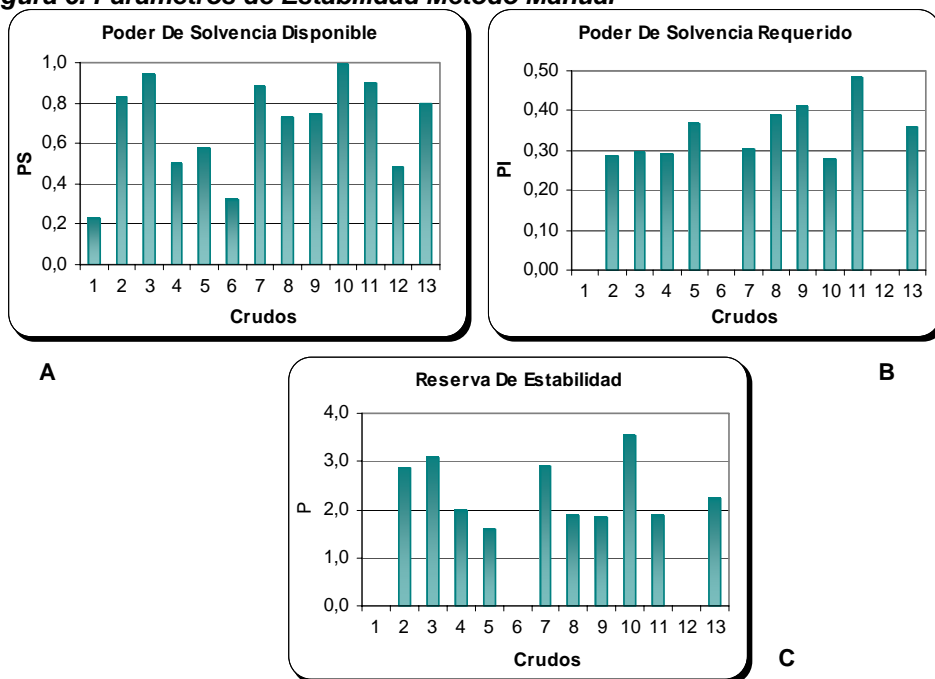
La destilación simulada (*Figura 5*) permite apreciar que los crudos más livianos tienen un mayor porcentaje de destilado a bajas temperaturas (446.4 – 558.7 °C), donde predominan hidrocarburos saturados de alta relación H/C de menores puntos de ebullición. Por el contrario, los crudos más pesados requieren de altas temperaturas (> a 500°C) para su total destilación y tienen una mayor cantidad de material residual.

Los puntos de ebullición también demuestran el grado aromático de los crudos Rubiales, Ayacucho (Mz 9) y Omimex ya que a mayores puntos de ebullición mayor será el número de anillos nafténicos presentes.

3.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE CRUDOS

3.2.1 Método Manual. Los parámetros que se obtuvieron se presentan en la figura 6; en el Anexo A tabla 12 se muestra la serie asignada a cada uno de los crudos en estas figuras.

Figura 6. Parámetros de Estabilidad Método Manual



Los crudos pesados tienen valores altos de Poder de Solvencia disponible (Figura 6A), seguidos en orden descendente por los medianos y livianos respectivamente.

Altos valores de PS indican que las interacciones intermoleculares que se presentan en la fase aceite del crudo son lo suficientemente efectivas para mantener a los asfaltenos en equilibrio gracias a la presencia de grupos funcionales en sus moléculas.

El Poder de Solvencia requerido por los asfaltenos para mantenerse en suspensión (Figura 6B) aumenta al incrementarse la cantidad de insolubles en $n - C_7$, es así como los crudos Rubiales y Mz OCLL presentan altos valores de PI; 0,4815 y 0,4102 respectivamente.

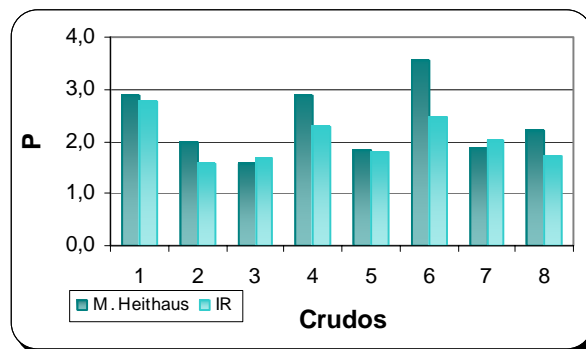
En la figura 6C (reserva de estabilidad) los crudos Mz. Ayacucho, Mz. Ayacucho (Mz 9), Mz. OAM y Omimex, presentan altos valores de este parámetro lo que indica que estos son los más estables. A su vez los crudos

que presenten bajos valores de P tendrán tendencia a precipitar los asfaltenos ante cualquier perturbación termodinámica.

La titulación manual tuvo un seguimiento en la detección del onset mediante la medida del Índice de Refracción para validar los resultados obtenidos en la literatura e implementar ésta técnica como una metodología adicional con un mayor grado de precisión de la cromatografía en papel.

En la figura 7 se presenta la comparación entre la cromatografía en papel y el Índice de Refracción, para la reserva de estabilidad. (Los resultados de las mediciones de cada crudo se presentan en el anexo C y la serie asignada a cada crudo en el anexo A tabla 13).

Figura 7. Reserva de Estabilidad por Heithaus e Índice de Refracción

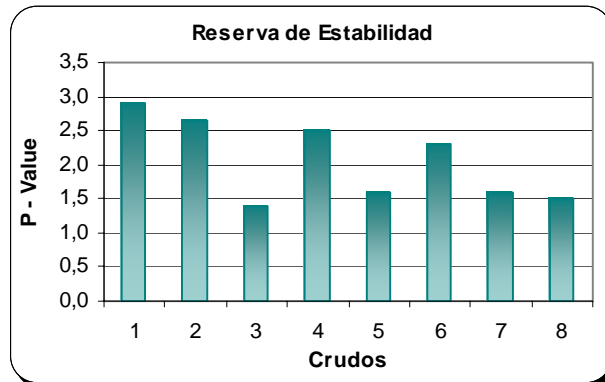


Como se observa en la figura no es viable la implementación de esta técnica, debido a la gran desviación que se presenta, lo que puede deberse a que al realizar las mediciones el volumen tomado de muestra excede el volumen agregado de titulante variando las condiciones de la solución, caso contrario en la cromatografía en papel donde los volúmenes tomados son menores. Esta desviación se mantuvo en los parámetros PS y PI.

3.2.2 Método Automático

3.2.2.1 P – Value. Los crudos analizados se listan en el Anexo A tabla 13 y los resultados se muestran en la figura 8.

Figura 8. Parámetro de Estabilidad Método Automático



Los crudos presentan la misma tendencia en cuanto a estabilidad, con relación al método manual. Esto representa que el método es válido no solo para crudos pesados sino también para crudos medianos.

Los crudos Mz Ayacucho, Mz Ayacucho (Mz 9), Mz OAM y Omimex son los de mayor reserva de estabilidad, seguidos por Rubiales, Mz OCLL, Southblend y Caño Limón.

3.2.2.2 Po / FRmax. Los crudos Rubiales, Mz Ayacucho (Mz 9) y Mz OAM fueron titulados mediante este método, los dos primeros no arrojaron resultados satisfactorios y presentaron un comportamiento anormal durante el análisis.

Por el contrario el crudo Mz OAM presentó un buen comportamiento durante la prueba, el software proporcionó los valores que se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Comparación Heithaus – Po/FRmax

MÉTODO	PARÁMETRO		
	PS	PI	P
HEITHAUS	0.8824	0.30555	2.887
Po/FRmax	0.67	0.28	2.64

Los valores obtenidos por los dos métodos son cercanos y al aplicar la equivalencia entre escalas (Castro et al, 2004) el error es muy pequeño lo cual indica que el método manual sigue siendo una buena opción para el cálculo de los parámetros de estabilidad de un crudo.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS

Las mezclas se caracterizaron de la misma manera que los crudos. Los resultados se presentan en el anexo C.

Todas las mezclas que se prepararon se clasifican en medianas y livianas de acuerdo a la gravedad API.

El contenido de azufre mostró ser directamente proporcional a la estabilidad de las muestras, así, la mezcla 27² es la más estable puesto que los crudos que lo componen tienen altos valores de este elemento proporcionándole condiciones favorables para mantener los asfaltenos en solución.

Las mezclas que son inestables (21, 22, 24, 32, 36 y 39) y las críticamente estables (1, 6, 8, 23, 25, 28, 33 y 34) por el contrario tienen valores bajos de azufre.

Con respecto a las destilaciones simuladas, las mezclas 2, 22, 32, 33 y 34 presentaron los más altos valores de destilado (93 – 94 %) por el contrario las mezclas 27 y 31 tienen los porcentajes de destilación más bajos debido a que son mezclas medianas y de carácter nafténico.

² Ver componentes en el Anexo A tabla 14.

También se observó que la distribución de temperaturas en las mezclas no fue tan amplia como se presentó en los crudos.

En cuanto a los porcentajes de naftas y keros las mezclas livianas como son la 21, 22, 23 y 24 tienen las mayores proporciones como era de esperarse dado su carácter parafínico.

Adicionalmente, las mezclas presentaron un orden descendente de monoaromáticos de acuerdo al grado de estabilidad de ellas, siendo las inestables las de mayor cantidad, seguidas por las críticamente estables y por último las estables.

Con incrementos en el número de aromáticos la tendencia cambia al igual que en los crudos, siendo las mezclas más estables las de mayor porcentaje en peso debido a que estas mezclas parafínicas tienen mayor poder de solubilización de asfaltenos confiriendo mayor estabilidad.

3.4 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE MEZCLAS.

3.4.1 Método Manual. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 10. En la tabla 14 anexo A se lista el número asignado a cada mezcla y sus respectivos componentes.

Tabla 10. Parámetros de Estabilidad Método Manual

Propiedad	Número de Mezcla							
	1	2	3	4	5	6	7	8
PS	0.4642	0.5271	0.6802	0.6670	0.6322	0.4856	0.5815	0.3430
PI	0.3660	0.3726	0.3880	0.3880	0.3911	0.3859	0.3764	0.2985
P	1.2683	1.4147	1.7538	1.7190	1.6165	1.2583	1.5451	1.1491

Propiedad	Número de Mezcla							
	9	10	11	12	13	14	15	16
PS	0.5824	0.4449	0.5102	0.7851	0.5244	0.8361	0.6083	0.6024
PI	0.3594	0.3013	0.3354	0.4069	0.3763	0.4224	0.3389	0.3667
P	1.6205	1.4766	1.5212	1.9295	1.3935	1.9794	1.7916	1.6425

Propiedad	Número de Mezcla							
	17	18	19	20	21	22	23	24
PS	0.5163	0.5729	0.4892	0.5271	0.1759	0.2687	0.2745	0.3298
PI	0.3488	0.3703	0.3613	0.3726	0.3015	0.3950	0.3226	0.4581
P	1.4802	1.5470	1.3540	1.4147	0.5834	0.6803	0.851	0.7199

Propiedad	Número de Mezcla							
	25	26	27	28	29	30	31	32
PS	0.6345	0.3995	0.7309	0.2163	0.6092	0.7957	0.8450	0.7957
PI	0.4732	0.2914	0.2689	0.3428	0.3747	0.4135	0.3697	0.4135
P	1.3409	1.3710	2.7181	0.6310	1.6258	1.9243	2.2856	1.9243

Propiedad	Número de Mezcla							
	33	34	35	36	37	38	39	40
PS	0.3039	0.2394	0.4191	0.6166	0.6422	0.6295	0.2431	0.6552
PI	0.2372	0.2817	0.3299	0.3679	0.3503	0.3588	0.3448	0.3946
P	1.2812	0.8498	1.2704	1.6760	1.8333	1.7545	0.85	1.6604

Las mezclas 27, 31, 14, 12, 32 y 30 son respectivamente las de mayor reserva de estabilidad, como era de esperarse puesto que presentan altos valores de PS y bajos valores de PI; si los valores de sus parámetros estuvieran cercanos se considerarían mezclas críticamente estables o inestables si el valor de P es inferior a la unidad, por ejemplo, las mezclas 21, 22, 23, 24, 28, 34 y 39 son inestables y las mezclas 1, 6, 8 y 33 son críticamente estables.

3.5 CÁLCULO DE LOS INTERVALOS DE COMPATIBILIDAD

Los porcentajes de los crudos que componen las mezclas variaron entre el 5 y el 90%, para poder definir así los parámetros de estabilidad en un amplio rango.

Los intervalos de compatibilidad se determinaron como se especificó en la sección 2.7, estos resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Intervalos de Compatibilidad.

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO 4	CRUDO 5	C1 %VV	C2 %VV	C3 %VV	C4 %VV	C5 %VV
M. Ayacucho	Caño Limón				Compatibles				
M. Ayacucho	M ODC	Caño Limón			Compatibles				
M. Ayacucho (m1)	M ODC	Caño Limón			Compatibles				
M. Ayacucho	M ODC	Caño Limón	Cusiana		Compatibles				
M. Ayacucho	M ODC	Cusiana			Compatibles				
M. Ayacucho	Southblend	M ODC	Caño Limón	Calypso	Compatibles				
M. Ayacucho	Southblend	M ODC			Compatibles				
M. Ayacucho	Caño Limón	Calypso			Compatibles				
M. Ayacucho	M OCLL	Caño Limón			Compatibles				
M. Ayacucho	M ODC	Caño Limón	SCRAVOS		> 5	> 5	> 10	< 80	
M. Ayacucho	M ODC	Calypso			Compatible				

CRUDO 1	CRUDO 2	CRUDO 3	CRUDO 4	CRUDO 5	C1 %VV	C2 %VV	C3 %VV	C4 %VV	C5 %VV
M. Ayacucho	Southblend	MODC	Caño Limón		Compatible				
Caño Limón	Calypso				Compatible				
MzODC	ABO				> 60	< 40			
Caño Limón	ABO				> 70	< 30			
MzODC	Caño Limón	ABO			> 35	> 40	< 25		
MzOCLL	Caño Limón	ABO			> 25	> 30	< 45		
Rubiales	ABO				> 60	< 40			
MzOCLL	Cusiana				> 30	< 70			
Caño Limón	Cusiana	ABO			> 50	> 30	< 20		
Calypso	ABO				> 60	< 40			
OMIMEX	MOAM	Calypso			Compatibles				

CONCLUSIONES

- Los parámetros de estabilidad deben ser introducidos como herramienta auxiliar en la planificación de la dieta de las refinerías para asegurar la estabilidad de las cargas y evitar problemas en el proceso de mezclado y posteriores etapas de refinación.
- La información de caracterización fisicoquímica utilizada para correlacionar los datos con los parámetros de solubilidad no fue suficiente debido a que no fue posible construir modelos estables, siendo necesario incluir más variables para brindarle mayor estabilidad a los modelos.
- En los análisis de datos es necesario realizar un agrupamiento de los mismos, para brindarle estabilidad a los modelos que se construyan, pues se evita la multicolinealidad en las variables como se observó en el anexo D.
- El Equipo SHELL ZEMATRA a pesar de estar diseñado para muestras pesadas y viscosas como fondos de vacío, Slurry y combustibles, mostró resultados satisfactorios en la determinación del parámetro P mediante el método P- Value en crudos pesados y medianos. Sin embargo, bajo las condiciones de trabajo utilizadas el método Po/FRmax no arrojó buenos resultados en muestras muy parafínicas ni muy aromáticas.
- De los métodos utilizados la titulación de Heithaus fue la que mostró resultados más consistentes en la determinación de parámetros de estabilidad, pues permitió generar más información y de manera más completa de todo tipo de muestras. Sin embargo es necesario complementar la cromatografía en papel con observaciones en el

microscopio, para determinar de manera exacta el punto de precipitación de los asfaltenos.

- El uso del Índice de Refracción debe ser estudiado con mayor detenimiento, pues según la literatura es una herramienta que puede ser utilizada para la caracterización y evaluación del grado de estabilidad de un crudo o mezcla de ellos pero en las pruebas realizadas no permitió detectar confiablemente el punto de precipitación de asfaltenos.
- Los intervalos de compatibilidad hallados durante la experimentación indican que en la carga de crudos a la refinería de Cartagena se deben controlar muy bien los porcentajes en los cuales se mezclan crudos de las características de ABO y Caño Limón, debido a que altos volúmenes de éstos pueden generar inestabilidades.
- Las mezclas promedios preparadas en GRC no presentaron inestabilidad, sin embargo es importante destacar que el crudo ABO deben manejarse en proporciones inferiores al 40 % V/V.

BIBLIOGRAFÍA

1. AFANASIEVA, Natalia Nikolaevna. "Estudio de la estructura y composición química de los crudos Castilla y Cocorná y de los asfaltos de la refinería de Barranca y Cartagena por métodos de análisis instrumental" Tesis de Grado. UIS. 1994.
2. ALAYON, Mario. "Asfaltenos Ocurrencia y Floculación," Cuaderno Firp S369-PP, Modulo De Enseñanza En Fenómenos Interfaciales. Universidad De Los Andes, Escuela De Ingeniería Química, Lab. Formulación, Interfaces, Reología y Procesos. Mérida – Venezuela. 2004, 3-15.
3. ASKE, Narve. "Characterization of crude oil components, asphaltene aggregation and emulsion stability by means of near infrared spectroscopy and multivariate analysis", Trondheim, 2002. 49 p. Thesis (Doctor Ingenior). Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering.
4. BUCKLEY, J.S., Hirasaki, G.J., Liu, Y., Von Drasek, S., Wang, J.X and Gill, B.S. "Asphaltene Precipitation and Solvent Properties of Crude Oils," Petroleum Science and Technology. 1998, 16, No. 3-4, 251-285.
5. BUCKLEY, Jill. S. "Predicting the Onset of Asphaltene Precipitation from Refractive Index Measurements", Energy & Fuels. 1999, 13, 328 –332.
6. CASTRO, Marisol y Alejandra Macias. "Estudio del Comportamiento de las Propiedades Fisicoquímicas Y Reológicas de Mezclas De Crudos y su Relación con la Compatibilidad", UIS – ICP, 2004, 102p.

7. HEITHAUS, J.J. Measurement and significance of asphaltene peptization. J. Inst. Pet. v.48, 1962. p 45-53.
8. Jianxin, Wang and Jill Buckley. "Procedure for Measuring the Onset of Asphaltene Flocculation," New Mexico Tech, Socorro, NM 87801
9. Kaushik, Gandhi. "Characterization Of Crude Oils And Heavies," Department of Chemical and Fuels Engineering, University of Utah. 3-27.
10. MOUSAVI DEHGHANI, M. R Riazi, M. Vafaie Sefti and G. A. Mansoori. "An Analysis of Methods for Determination of Onsets of Asphaltene Phase Separations", Journal of Petroleum Science and Engineering. 2004, 42, 145 – 156.
11. PINEDA FLORES, Gabriel and Ana María Mesta Howard "Petroleum Asphaltenes, Generated Problematic and Possible Biodegradation Mechanisms," Revista Latinoamericana De Microbiología ALAM. July - September. 2001, Vol. 43, No. 3, 143–150.
12. SMS 2527-94. Determination of Peptizing Power of Distillate Fuel Oils.
13. SPEIGHT, James G. "Handbook of Petroleum Analysis", 2001, 25 – 56, 61 – 83.
14. Standard Test Method for Refractive Index and Refractive Dispersion of Hydrocarbon Liquids. Designation: D 1218 – 02.
15. SUNIL, L. Kokal and Selim G. Sayegh. "Asphaltenes: The Cholesterol of Petroleum," Society of Petroleum engineers. 1995, 169 – 177

16. WIEHE, Irwin A and Raymond J. Kennedy. "Application of the Oil compatibility Model to Refinery Streams," *Energy & Fuels*. 2000, *14*, 60-63.
17. _____. Process for blending petroleum oils to avoid being nearly incompatible. U.S. Patent 5,871,634, 1999.
18. _____. The oil compatibility model and crude oil incompatibility. *Energy and Fuels*, 2000. v.14. p 56-59.
19. [www. OSHA. Gov](http://www.OSHA.Gov)

ANEXO A

Nomenclatura de crudos y mezclas

Tabla 12. Serie asignada a los crudos figura 6.

Serie	Crudo	Serie	Crudo
1	ABO	8	Mz ODC
2	Mz Ayacucho	9	Mz OCLL
3	Mz Ayacucho (Mz 9)	10	Omimex
4	Calypso	11	Rubiales
5	Caño Limón	12	Scravos
6	Cusiana	13	Southblend
7	Mz OAM		

Tabla 13. Serie asignada a los crudos figura 7.

Serie	Crudo	Serie	Crudo
1	Mz Ayacucho	5	Mz OCLL
2	Mz Ayacucho (Mz 9)	6	Omimex
3	Caño Limón	7	Rubiales
4	Mz OAM	8	Southblend

Tabla 14. Componentes de las mezclas preparadas.

7	35% Mz ODC, 35% Mz Ayacucho, 30% Southblend	27	30% Calypso, 30% Mz OAM, 40% Omimex
8	40% Mz Ayacucho, 30% Caño Limón, 30% Calypso	28	30% Caño Limón, 70% Cusiana
9	26% Mz ODC, 27% Mz Ayacucho, 20% Caño Limón, 10% Southblend, 17% Calypso	29	10% Mz Ayacucho, 60% Caño Limón, 30% Mz OCLL
10	40% Caño Limón, 60% Calypso	30	15% Mz Ayacucho, 35% Caño Limón, 50% ABO
11	26% Mz ODC, 15% Mz Ayacucho, 59% Calypso	31	46% Mz Ayacucho, 34% Caño Limón, 20% Mz OCLL
12	50% Mz ODC, 15% Mz Ayacucho, 16% Caño Limón, 19% Scravos	32	20% Caño Limón, 80% ABO

13	50% Mz ODC, 13% Mz Ayacucho, 8% Caño Limón, 30% Scravos	33	25% Calypso, 75% ABO
14	70% Mz ODC, 30% ABO	34	30% Caño Limón, 20% Cusiana, 50% ABO
15	50% Caño Limón, 50% ABO	35	45% Caño Limón, 55% Cusiana
16	44% Mz ODC, 44% Caño Limón, 13% ABO	36	20% Mz ODC, 80% ABO
17	14% Mz ODC, 30% Mz Ayacucho, 25% Caño Limón, 31% Southblend	37	33% Mz Ayacucho, 30% Mz ODC, 47% Caño Limón
18	38% Mz ODC, 12% Mz Ayacucho, 20% Caño Limón, 30% Southblend	38	10% Mz Ayacucho, 60% Caño Limón, 30% Mz ODC
19	35% Mz ODC, 25% Mz Ayacucho, 40% Caño Limón	39	15% Mz ODC, 20% Caño Limón, 65% ABO
20	25% Mz OCLL, 30% Caño Limón, 45% ABO	40	30% Mz ODC, 35% Caño Limón, 35% ABO

ANEXO B

Evaluación de crudos y mezclas de crudos por microscopía y cromatografía en papel

Cada muestra fue examinada microscópicamente para determinar la presencia de asfaltenos, el comportamiento de ellos y de los cristales de ceras al incrementar la temperatura; de igual forma se evaluó la apariencia física de las muestras estables e inestables.

Como se mencionó anteriormente éstas imágenes se obtuvieron a dos temperaturas 21 y 65 °C, presentándose en la parte derecha la de menor temperatura y en la izquierda la de mayor.

Las fotografías se presentan con diferentes afinaciones con el fin de lograr una buena visualización de los asfaltenos, debido al pequeño tamaño que tienen.

En estas, las ceras son más grandes, no uniformes y tienen un color marrón oscuro. En algunas muestras como se aprecia, al incrementar la temperatura, las ceras no fundieron, esto se debe al tipo de cera.

En otras imágenes, se puede observar la presencia de agua, la cual es anormal, puesto que los crudos son deshidratados antes ser sometidos a tratamiento. El agua se puede ver como pequeños círculos con centro blanco y aureola negra.

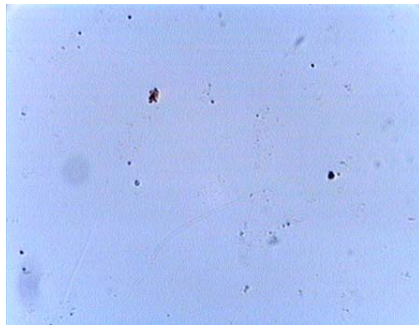
A continuación se presentan solamente las imágenes que se obtuvieron al evaluar los crudos y las mezclas de crudos inestables. Primero se observan las imágenes obtenidas por microscopía y a continuación la obtenida por Cromatografía en papel.

Las imágenes de Cromatografía en papel³ presentan 3 fases:

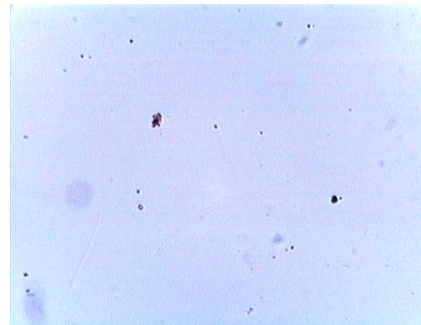
³ Sólo se le realizó a las muestras con alto contenido de asfaltenos (>0.1%).

- A = Asfaltenos dispersos
- B = asfaltenos empezando a flocular
- C = Asfaltenos Floculados

Figura 9. Crudo ABO

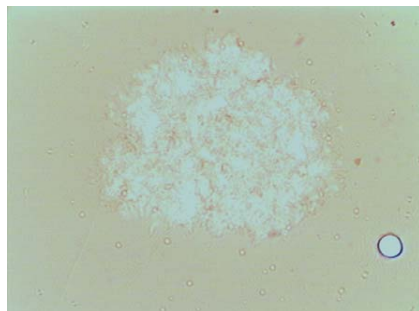


T = 23°C
Intensidad = 6

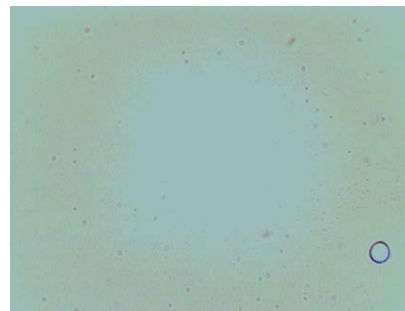


T = 68 °C
Intensidad = 6

Figura10. Crudo Mezcla Ayacucho



T = 22 °C
Intensidad = 8



T = 68 °C
Intensidad = 8

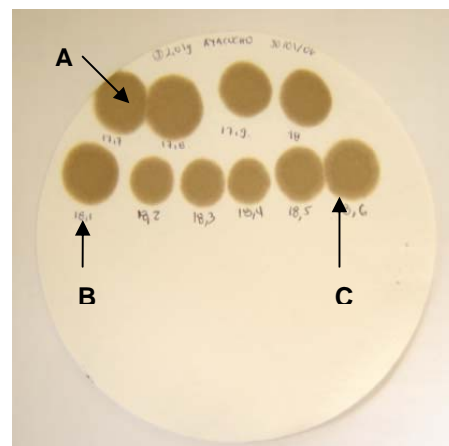
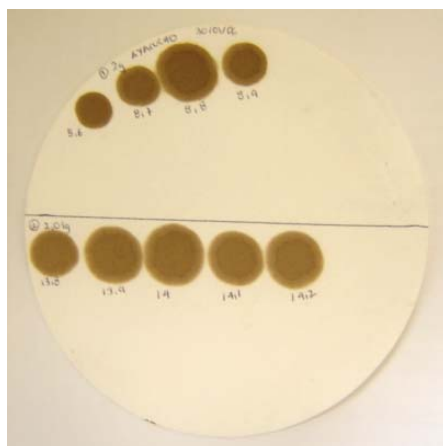
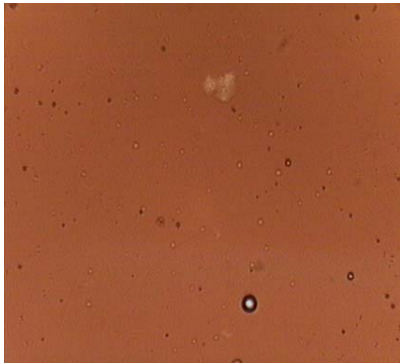
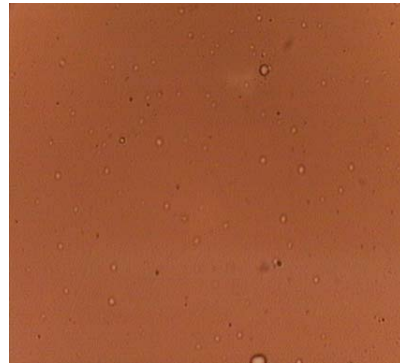


Figura 11. Crudo Mz Ayacucho (Mz 9)



T = 21 °C
Intensidad = 8



T = 68 °C
Intensidad = 8

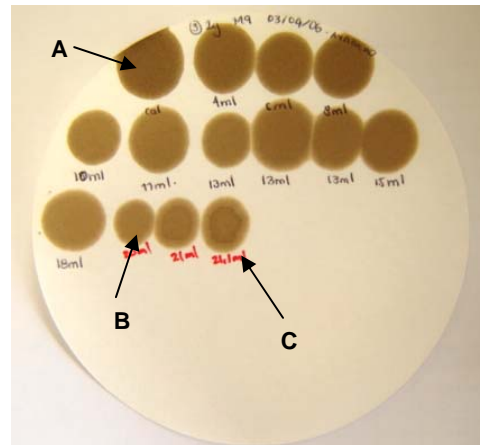
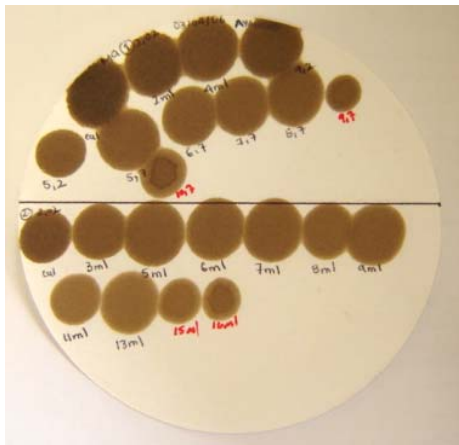
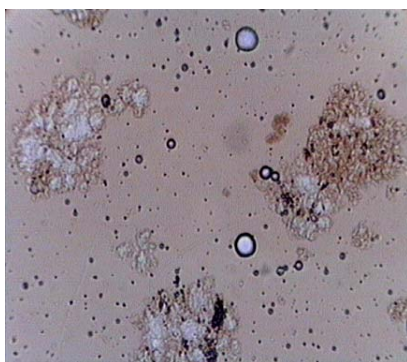
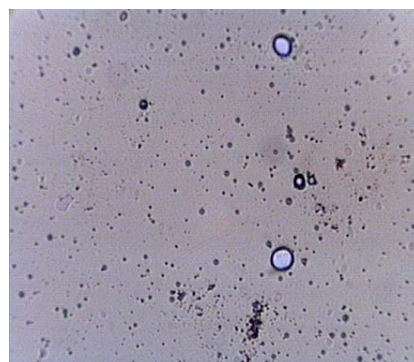


Figura 12. Crudo Calypso



T = 22 °C
Intensidad = 6



T = 67 °C
Intensidad = 6

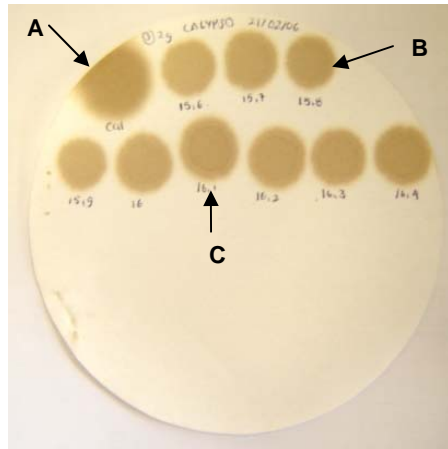
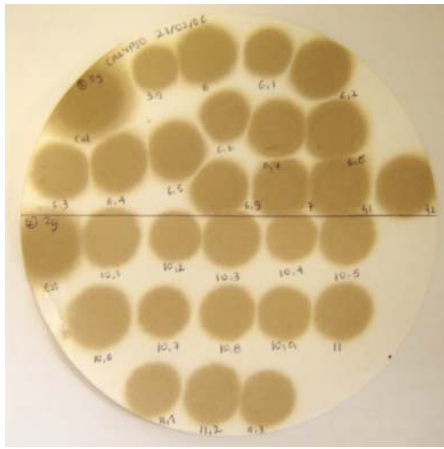
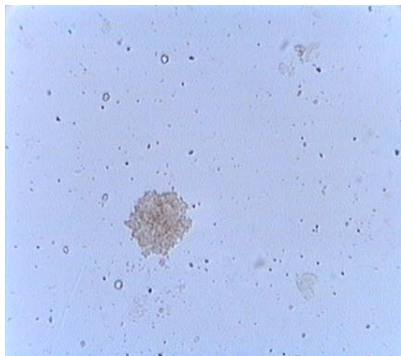
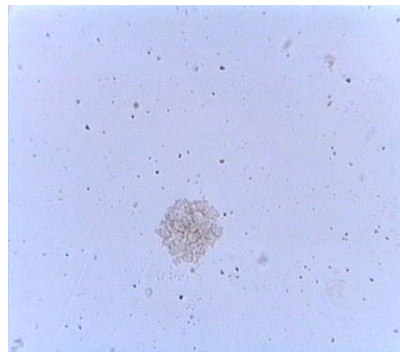


Figura 13. Crudo Cusiana

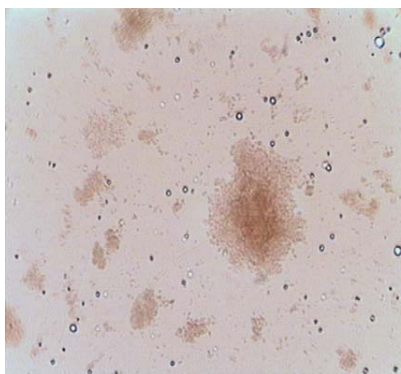


T = 23 °C
Intensidad = 6

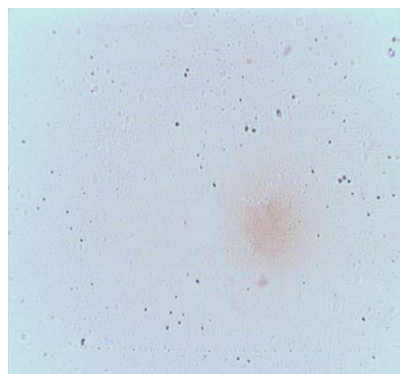


T = 68 °C
Intensidad = 6

Figura 14. Crudo Caño Limón



T = 21 °C
Intensidad = 7



T = 67 °C
Intensidad = 7

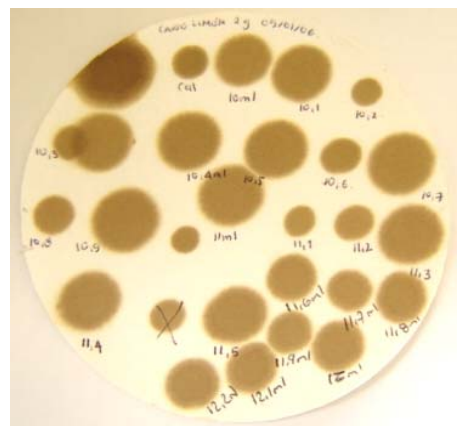
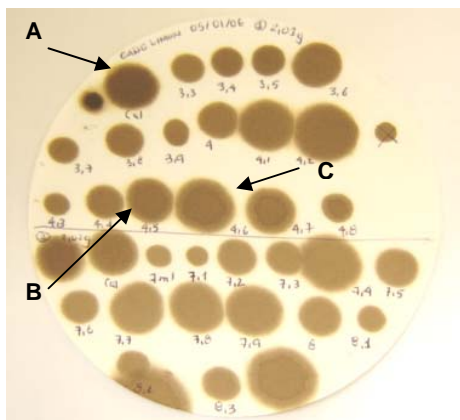
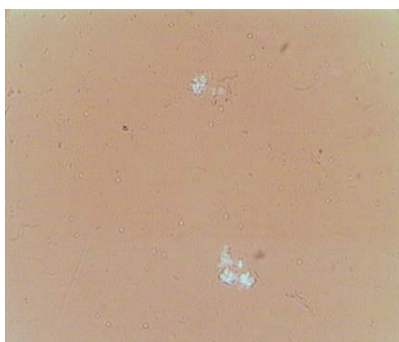


Figura 15. Crudo Mezcla OAM



T = 22 °C
Intensidad = 7



T = 67 °C
Intensidad = 7

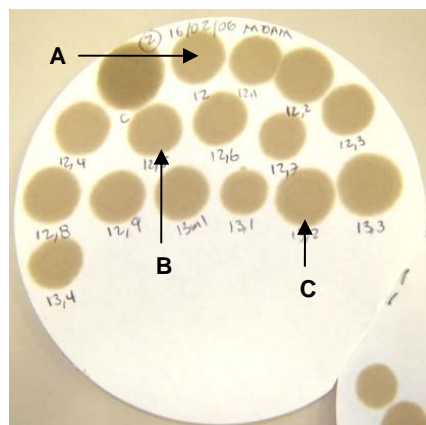
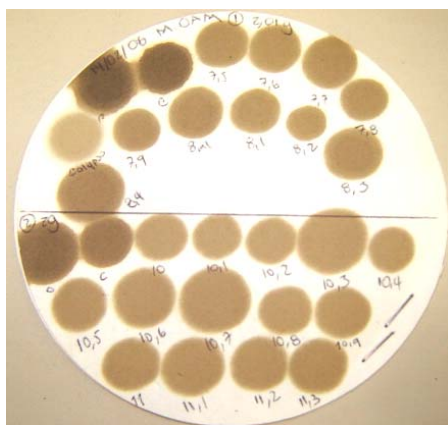
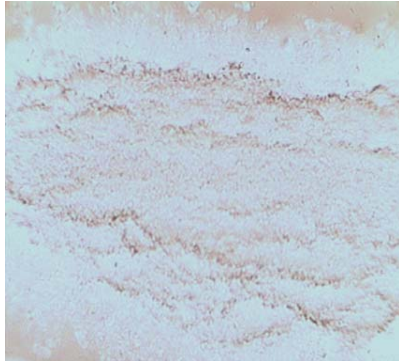
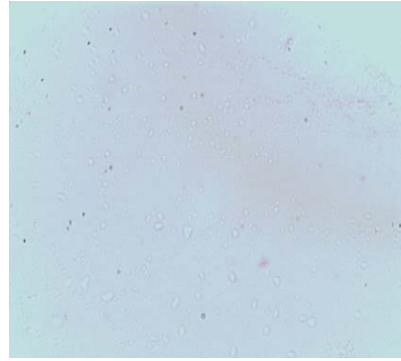


Figura 16. Crudo Mezcla OCLL



T = 22 °C
Intensidad = 7



T = 67 °C
Intensidad = 7

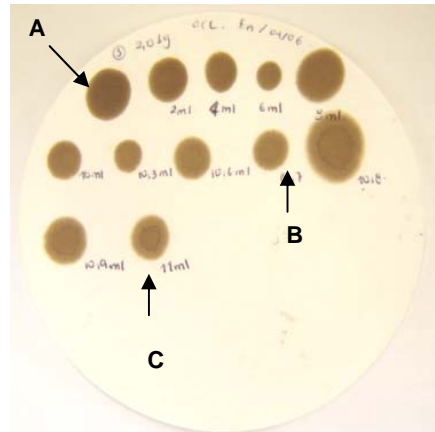
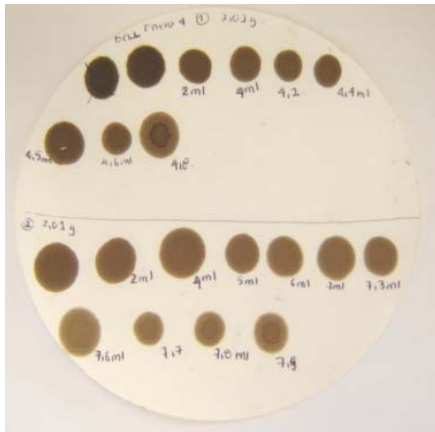
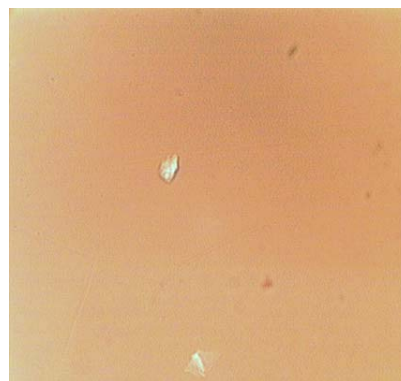


Figura 17. Crudo Mezcla ODC



T = 22 °C
Intensidad = 8



T = 67 °C
Intensidad = 8

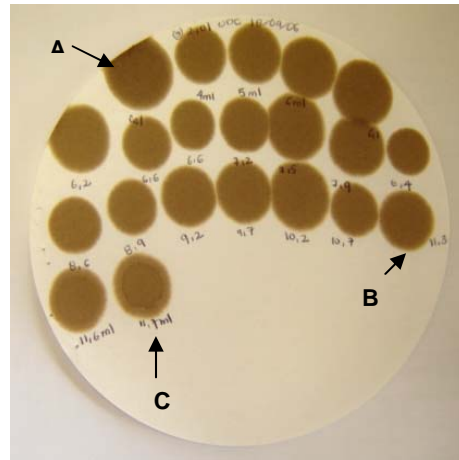
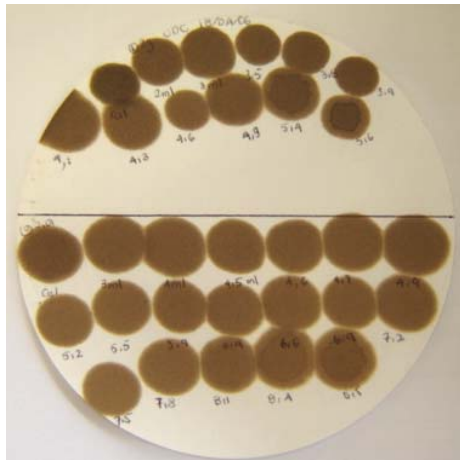
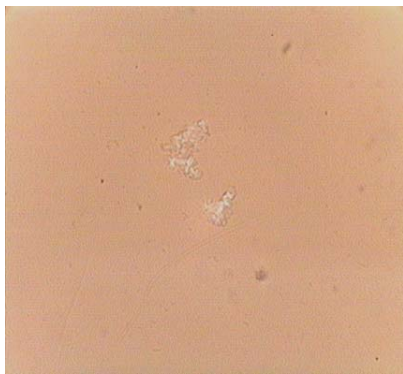
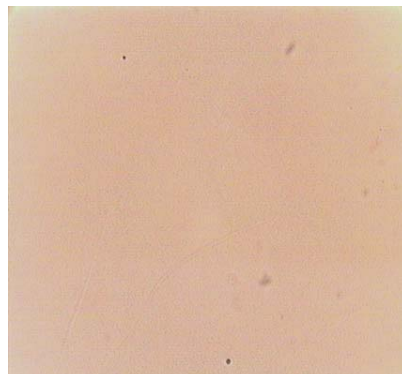


Figura 18. Crudo OMIMEX



T = 21 °C
Intensidad = 7



T = 67 °C
Intensidad = 7

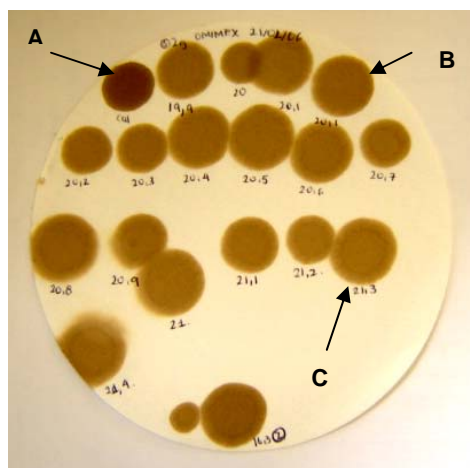
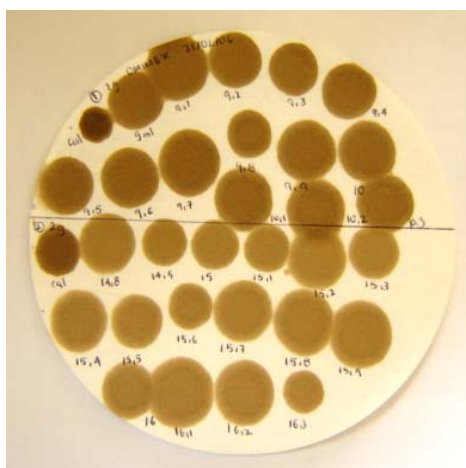
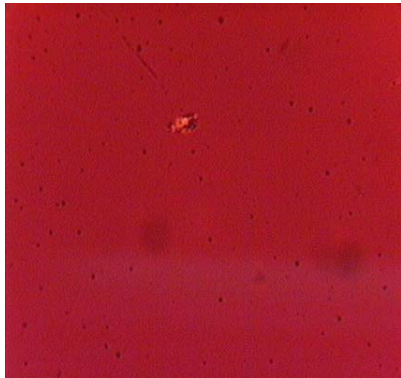
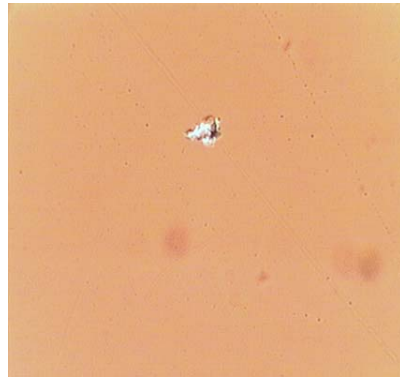


Figura 19. Crudo Rubiales



T = 21 °C
Intensidad = 13



T = 67 °C
Intensidad = 8,5

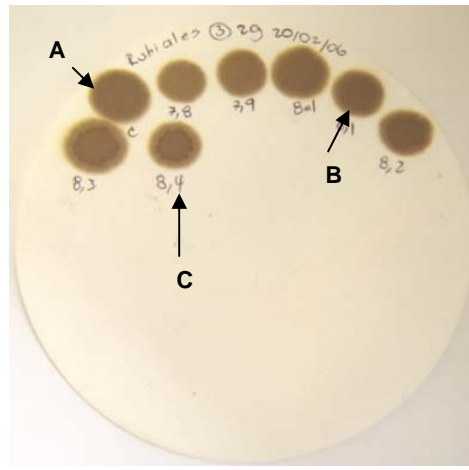
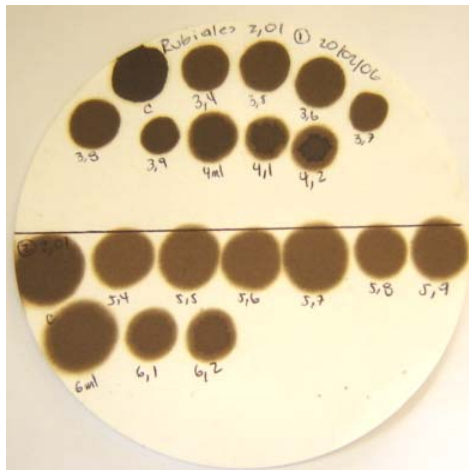
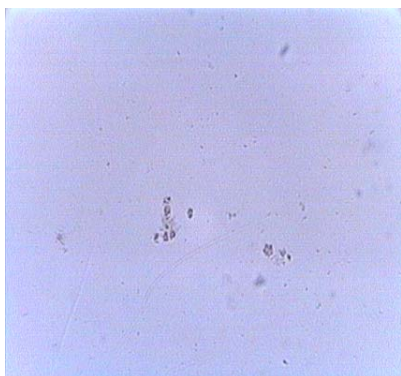


Figura 20. Crudo SCRAVOS

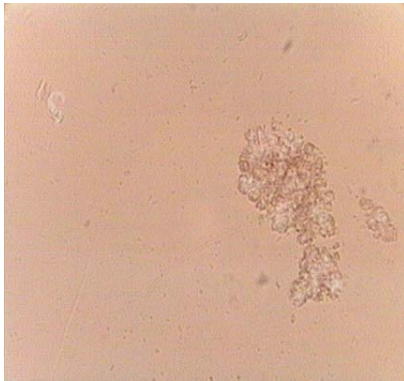


T = 21 °C
Intensidad = 6

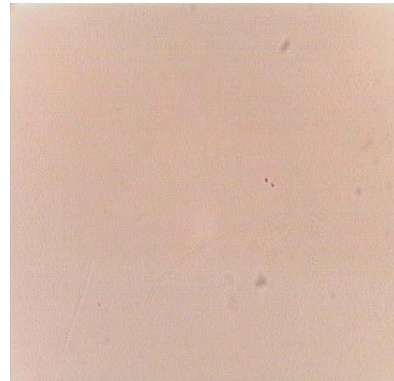


T = 67 °C
Intensidad = 6

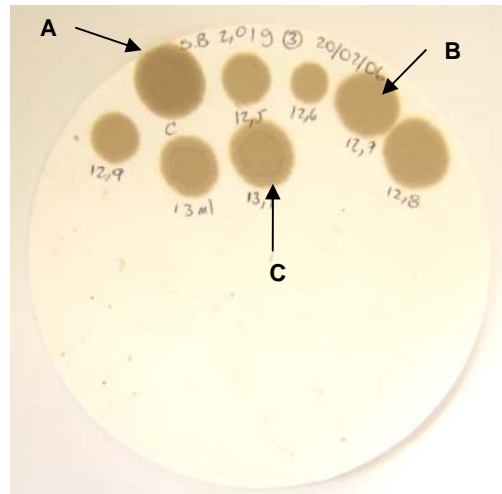
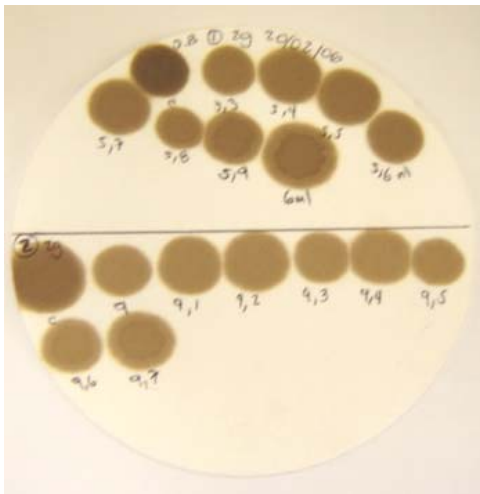
Figura 21. Crudo SOUTHBLEND



T = 22 °C
Intensidad = 7

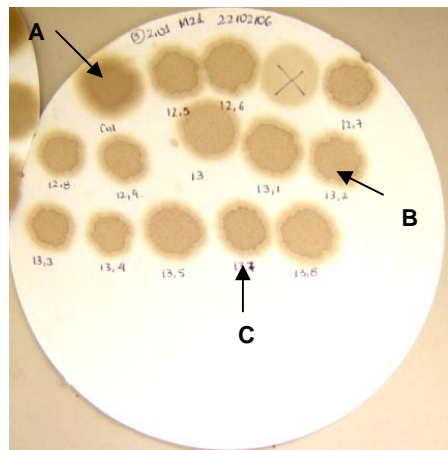
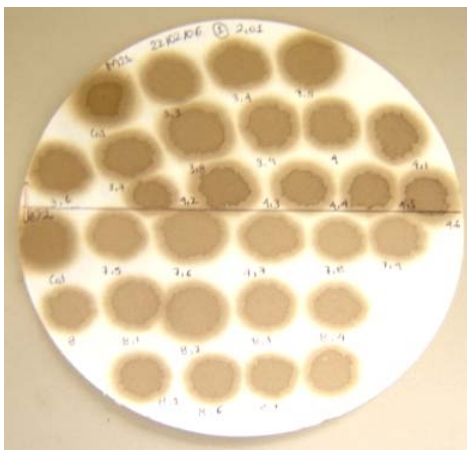
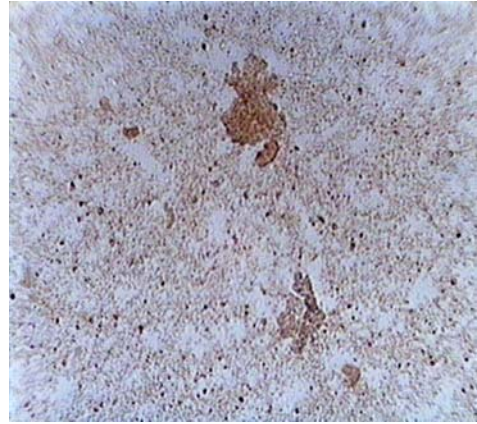
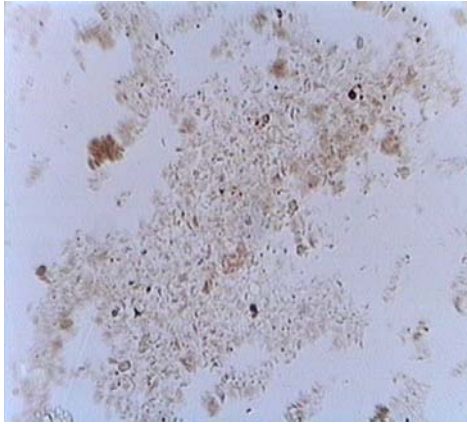


T = 67 °C
Intensidad = 7



Las imágenes presentadas a continuación corresponden a mezcla inestable (Mz 21), es importante observar la gran diferencia en cuanto a aspecto físico del crudo y en cromatografía en papel, al compararlas con muestras estables tales como Omimex, Rubiales, Southblend entre otras.

Figura 22. Mezcla Inestable



ANEXO C

Índice de Refracción (IR)

Esta metodología se le realizó a los crudos con alto contenido de asfaltenos (>0.1%) y a algunas mezclas para observar su aplicabilidad de acuerdo a la información que se tenía de los estudios realizados por Jill S Buckley, en los cuales se expresa que cada crudo tiene un IR característico, al igual que el punto en el cual ocurre la precipitación de los asfaltenos, además sirve para determinar el grado de estabilidad de una muestra de acuerdo a la diferencia entre el IR del crudo y el IR al cual ocurre la precipitación.

A continuación, se presentan los valores de IR obtenidos para las muestras tituladas por Heithaus de la muestra uno, las fracciones volumétricas de crudo, la cantidad de iso – octano agregada y la relación $(n^2-1)/(n^2+2)$ utilizada para mezclas de solvente, crudo y titulante.

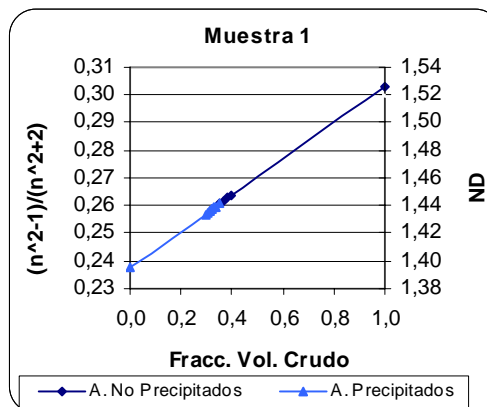
Las muestras dos y tres presentaron una tendencia similar a la muestra uno, por está razón no se incluyen.

La cantidad de iso- octano marcada con color azul, indica el punto de precipitación dado por el IR y la cantidad marcada con color rosado, indica el punto dado por la titulación de Heithaus. La gráfica que se muestra del lado derecho indica el punto a partir del cual se observa la precipitación de los asfaltenos utilizando la cromatografía en papel.

**TABLA 15. RESULTADOS IR CRUDO
Mz AYACUCHO**

Crudo Mz Ayacucho			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	fívolumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.518	1.000	0.303
6.5	1.441	0.398	0.264
7	1.438	0.381	0.263
7.5	1.436	0.365	0.262
8	1.434	0.350	0.261
8.5	1.433	0.336	0.260
8.6	1.432	0.333	0.260
8.8	1.432	0.328	0.259
9	1.431	0.323	0.259
9.2	1.431	0.319	0.259
9.4	1.430	0.314	0.258
9.6	1.430	0.310	0.258
9.8	1.429	0.305	0.258
10.3	1.427	0.295	0.257
	1.391	0.000	0.238

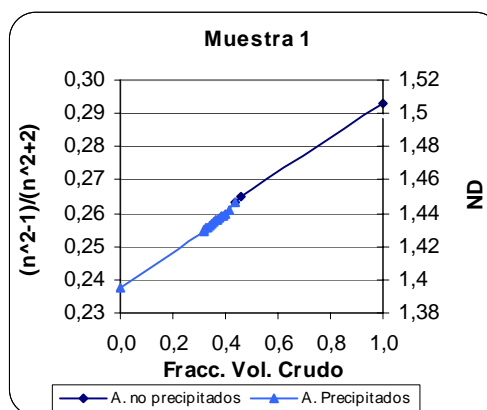
Figura 23. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Crudo MzAyacucho



**TABLA 16. RESULTADOS IR CRUDO
CALYPSO**

Crudo Calypso			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	fívolumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.498	1.000	0.293
5	1.443	0.461	0.265
5.5	1.440	0.438	0.263
6	1.435	0.416	0.261
6.5	1.433	0.397	0.260
6.7	1.432	0.390	0.259
6.9	1.431	0.383	0.259
7.1	1.431	0.376	0.259
7.3	1.430	0.370	0.258
7.5	1.429	0.363	0.258
7.8	1.429	0.354	0.258
8.1	1.427	0.346	0.257
8.4	1.426	0.338	0.256
8.7	1.425	0.330	0.256
8.9	1.424	0.325	0.255
	1.391	0.000	0.238

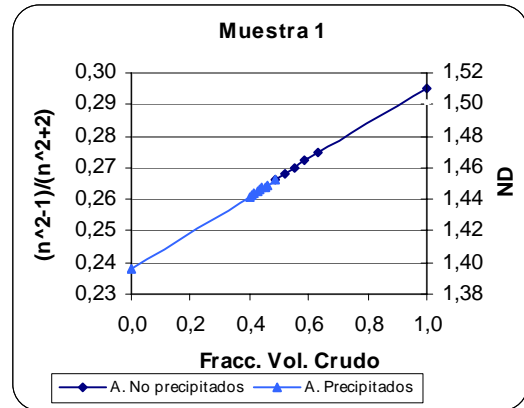
Figura 24. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Calypso



**TABLA 17. RESULTADOS IR CRUDO
CAÑO LIMÓN**

Crudo Caño Limón			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	f.volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.502	1.000	0.295
2.5	1.462	0.632	0.275
3	1.457	0.589	0.272
3.5	1.453	0.551	0.270
4	1.448	0.518	0.268
4.5	1.445	0.488	0.266
5	1.442	0.462	0.264
5.2	1.441	0.452	0.264
5.4	1.440	0.443	0.264
5.6	1.439	0.434	0.263
5.8	1.438	0.425	0.263
6	1.437	0.417	0.262
6.2	1.436	0.409	0.261
6.4	1.435	0.401	0.261
	1.391	0.000	0.238

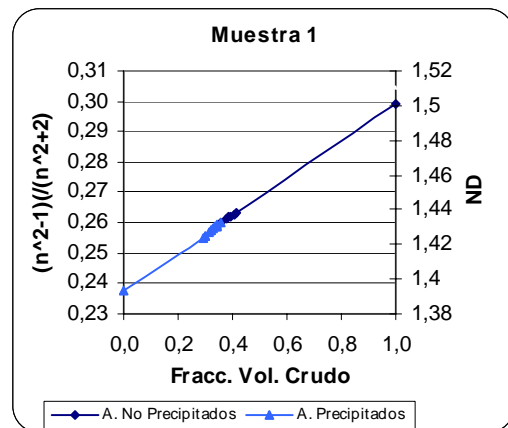
Figura 25. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Caño Limón



**TABLA 18. RESULTADOS IR CRUDO
Mz OAM**

Crudo Mz OAM			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	f.volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.510	1.000	0.299
6.2	1.439	0.405	0.263
6.5	1.438	0.394	0.262
6.7	1.437	0.387	0.262
7	1.435	0.376	0.261
7.5	1.433	0.360	0.260
8	1.432	0.346	0.259
8.1	1.431	0.343	0.259
8.2	1.431	0.340	0.259
8.4	1.430	0.335	0.259
8.6	1.430	0.329	0.258
8.8	1.429	0.324	0.258
9	1.428	0.319	0.257
9.2	1.428	0.315	0.257
	1.391	0.000	0.238

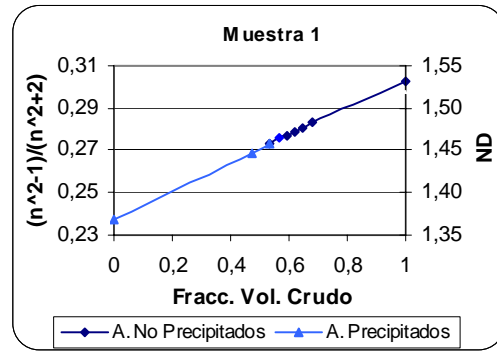
Figura 26. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mz OAM



**TABLA 19. RESULTADOS IR CRUDO
Mz OCLL**

Crudo Mz OCLL			
Muestra 1			
Vol iso-octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.518	1.000	0.303
2	1.478	0.678	0.283
2.3	1.474	0.647	0.281
2.6	1.470	0.619	0.279
2.9	1.467	0.593	0.277
3.2	1.463	0.569	0.276
3.7	1.458	0.533	0.273
4.7	1.449	0.473	0.268
	1.391	0.000	0.238

Figura 27. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mz OCLL



**TABLA 20. RESULTADOS IR CRUDO
Mz OMIMEX**

Crudo Omimex			
Muestra 1			
Vol iso-octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.519	1.000	0.303
3	1.464	0.580	0.276
5	1.448	0.453	0.268
6	1.442	0.408	0.265
6.5	1.439	0.389	0.263
7	1.437	0.372	0.262
7.5	1.435	0.356	0.261
8	1.433	0.341	0.260
8.5	1.431	0.328	0.259
9	1.429	0.315	0.258
9.5	1.428	0.304	0.257
10	1.426	0.293	0.256
10.5	1.424	0.283	0.255
11	1.423	0.274	0.254
	1.391	0.000	0.238

Figura 28. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de Mz OMIMEX

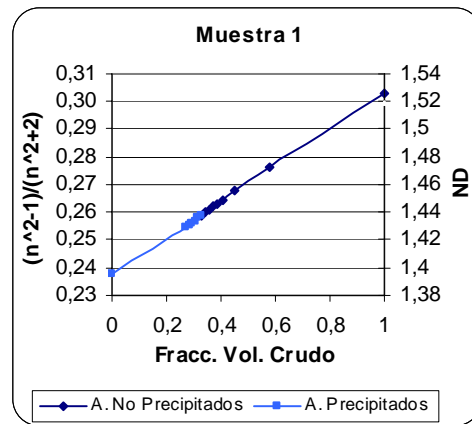


TABLA 21. RESULTADOS IR CRUDO RUBIALES

Crudo Rubiales			
Muestra 1			
Voliso-octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.535	1.000	0.311
2	1.489	0.670	0.289
2.5	1.481	0.619	0.284
3	1.475	0.575	0.282
3.5	1.471	0.537	0.279
3.7	1.469	0.523	0.278
3.9	1.467	0.510	0.277
4.1	1.464	0.497	0.276
4.2	1.463	0.491	0.275
4.3	1.463	0.486	0.275
4.5	1.461	0.474	0.274
4.7	1.459	0.463	0.273
4.9	1.458	0.453	0.273
	1.391	0.000	0.238

Figura 29. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de RUBIALES

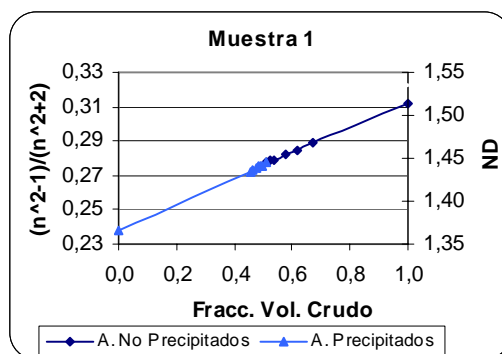
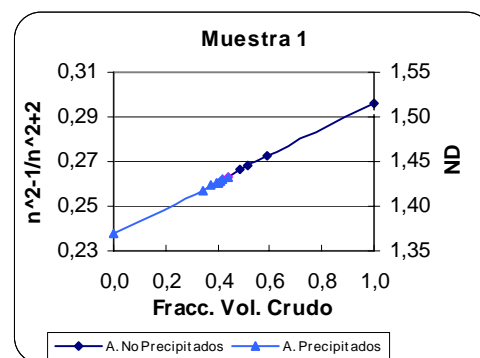


TABLA 22. RESULTADOS IR CRUDO SOUTHBLEND

Crudo Southblend			
Muestra 1			
Voliso-octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.504	1.000	0.296
3	1.457	0.588	0.272
4	1.448	0.517	0.268
4.5	1.445	0.488	0.266
5.5	1.439	0.438	0.263
6	1.437	0.417	0.262
6.2	1.436	0.409	0.261
6.4	1.435	0.401	0.261
6.6	1.434	0.394	0.261
7.1	1.432	0.376	0.259
8.1	1.428	0.346	0.257
	1.391	0.000	0.238

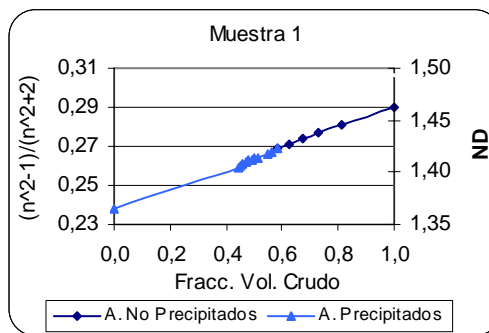
Figura 30. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de SOUTHBLEND



**TABLA 23. RESULTADOS IR
MEZCLA 1**

Mezcla 1			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.492	1.000	0.290
1	1.473	0.813	0.281
1.6	1.466	0.731	0.277
2.1	1.460	0.674	0.274
2.6	1.454	0.625	0.271
3.1	1.450	0.583	0.269
3.4	1.447	0.561	0.267
3.6	1.446	0.547	0.266
4.1	1.442	0.514	0.264
4.3	1.440	0.502	0.264
4.5	1.439	0.491	0.263
4.7	1.438	0.480	0.263
4.9	1.437	0.470	0.262
5.1	1.435	0.460	0.261
5.3	1.434	0.450	0.260
5.5	1.432	0.441	0.259
	1.391	0.000	0.238

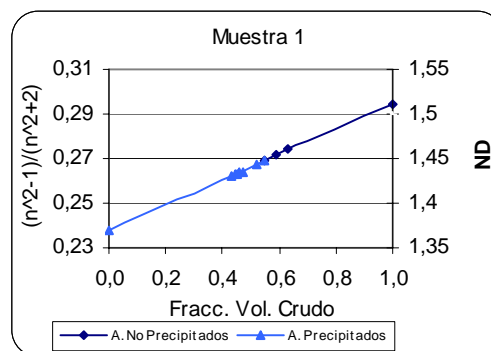
Figura 31. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 1



**TABLA 24. RESULTADOS IR
MEZCLA 2**

Mezcla 2			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.501	1.000	0.294
2.5	1.461	0.632	0.274
3	1.456	0.588	0.272
3.5	1.451	0.550	0.269
4	1.448	0.517	0.268
4.8	1.442	0.472	0.264
5	1.440	0.461	0.264
5.2	1.440	0.452	0.263
5.4	1.439	0.442	0.263
5.6	1.437	0.433	0.262
	1.391	0.000	0.238

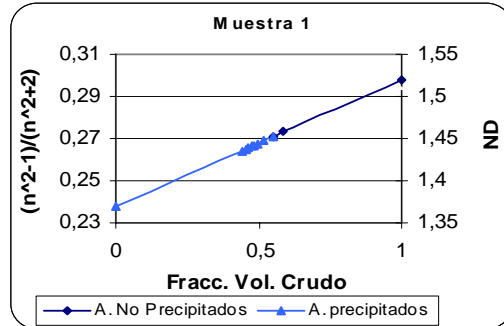
Figura 32. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 2



**TABLA 25. RESULTADOS IR
MEZCLA3**

Mezcla 3			
Muestra 1			
Vol iso-octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.508	1.000	0.298
3	1.459	0.586	0.273
3.5	1.454	0.548	0.271
4	1.450	0.514	0.269
4.3	1.448	0.496	0.268
4.5	1.447	0.485	0.267
4.7	1.445	0.474	0.266
4.9	1.444	0.464	0.265
5.1	1.442	0.454	0.265
5.3	1.441	0.444	0.264
	1.391	0.000	0.238

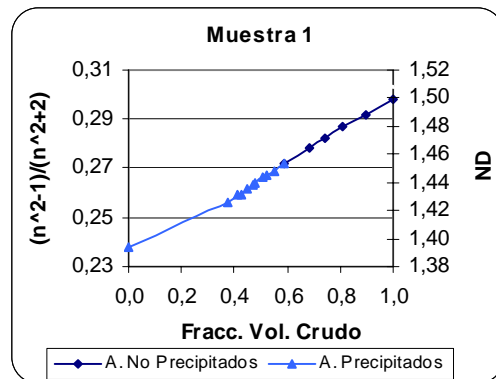
Figura 33. Comportamiento IR vs Fracción volumétrica de MEZCLA 3



**TABLA 26. RESULTADOS IR
MEZCLA4**

Mezcla 4			
Muestra 1			
Vol iso-octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.507	1.000	0.298
0.5	1.496	0.895	0.292
1	1.486	0.810	0.287
1.5	1.476	0.739	0.282
2	1.469	0.680	0.278
3	1.456	0.587	0.272
3.5	1.451	0.549	0.269
3.9	1.447	0.522	0.267
4.1	1.446	0.509	0.266
4.6	1.441	0.481	0.264
4.8	1.440	0.470	0.263
5.3	1.436	0.445	0.261
5.8	1.432	0.423	0.260
6	1.431	0.415	0.259
7	1.425	0.378	0.256
	1.391	0.000	0.238

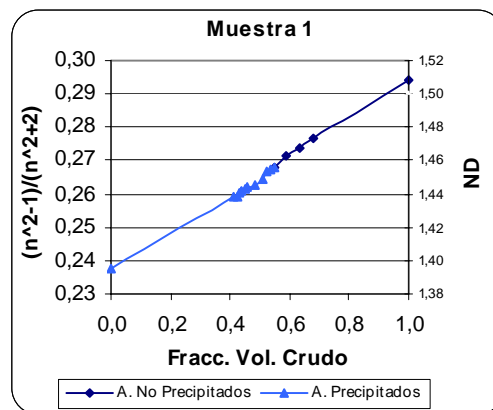
Figura 34. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 4



**TABLA 27. RESULTADOS IR
MEZCLA5**

Mezcla 5			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.500	1.000	0.294
2	1.465	0.683	0.277
2.5	1.460	0.633	0.274
3	1.455	0.589	0.271
3.5	1.449	0.552	0.268
3.7	1.447	0.538	0.267
3.9	1.446	0.525	0.267
4.1	1.442	0.512	0.265
4.6	1.438	0.484	0.263
5.1	1.437	0.458	0.262
5.3	1.436	0.448	0.261
5.5	1.435	0.439	0.261
5.7	1.434	0.430	0.260
5.9	1.432	0.422	0.259
6.1	1.431	0.414	0.259
	1.391	0.000	0.238

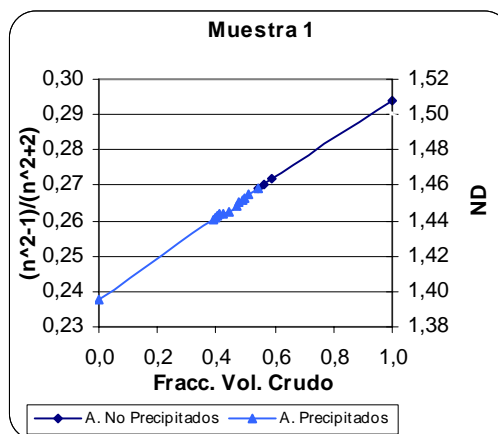
Figura 35. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 5



**TABLA 28. RESULTADOS IR
MEZCLA6**

Mezcla 6			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	f volumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.500	1.000	0.294
3	1.456	0.589	0.272
3.3	1.453	0.566	0.270
3.6	1.451	0.544	0.269
4.1	1.447	0.512	0.267
4.3	1.446	0.500	0.266
4.5	1.444	0.489	0.266
4.7	1.443	0.478	0.265
4.9	1.442	0.467	0.264
5.4	1.438	0.443	0.263
5.9	1.437	0.421	0.262
6.1	1.437	0.413	0.262
6.3	1.436	0.406	0.261
6.5	1.435	0.398	0.261
6.7	1.434	0.391	0.261
	1.391	0.000	0.238

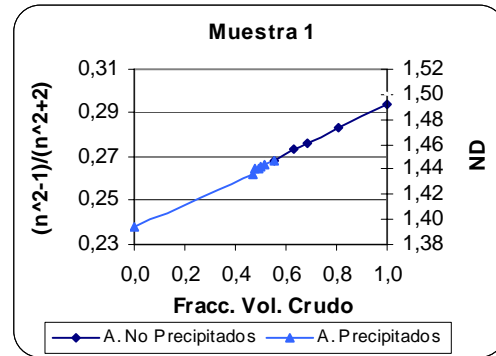
Figura 36. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 6



**TABLA 29. RESULTADOS IR
MEZCLA 13**

Mezcla 13			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	fívolumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.499	1.000	0.294
1	1.479	0.811	0.284
2	1.465	0.683	0.276
2.5	1.459	0.633	0.273
3.5	1.450	0.551	0.268
4	1.446	0.518	0.266
4.3	1.444	0.500	0.266
4.5	1.442	0.489	0.265
4.7	1.441	0.478	0.264
4.9	1.438	0.468	0.262
	1.391	0.000	0.238

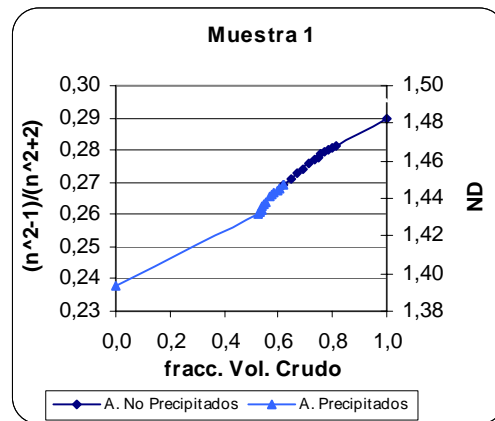
Figura 37. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 13



**TABLA 30. RESULTADOS IR
MEZCLA 21**

Mezcla 21			
Muestra 1			
Voliso- octano	IR	fívolumetrica C	$(n^2-1)/(n^2+2)$
0	1.491	1.000	0.290
1	1.475	0.815	0.281
1.1	1.473	0.800	0.281
1.3	1.471	0.772	0.279
1.4	1.470	0.758	0.279
1.6	1.467	0.733	0.277
1.8	1.464	0.709	0.276
2	1.461	0.687	0.274
2.2	1.458	0.666	0.273
2.4	1.454	0.647	0.271
2.7	1.451	0.619	0.269
2.9	1.448	0.602	0.268
3	1.447	0.594	0.267
3.1	1.446	0.586	0.267
3.3	1.444	0.571	0.266
3.5	1.441	0.556	0.264
3.6	1.439	0.550	0.263
3.7	1.438	0.543	0.262

Figura 38. Comportamiento IR vs fracción volumétrica de MEZCLA 21



ANEXO D

Caracterización de mezclas y destilaciones simuladas de crudos y mezclas

Tabla 31. Destilación Simulada de crudos

	ABO	Mz Ayacucho	Mz Ayacucho (Mz9)	Calypso	Caño Limón	Cusiana
%Vd	Temperatura °C					
IBP	-23,2	23,5	38,4	23,6	53,8	-39,5
10%	72,7	119,1	202,7	156,5	149,1	53,3
20%	109,1	175	284,8	218,9	205,4	91,5
30%	144,1	232,3	342,5	261,1	253,1	129,1
40%	186	280,3	397,1	297,5	300,2	170,9
50%	230,8	326,2	448,6	331,4	342,7	226,2
60%	269,1	377,1	502,5	370,2	392	268,7
70%	311,4	425,5	562,4	413,7	444,9	315,6
80%	369,1	480,4		462,8	509,7	370,7
90%	446,4			540,6		437,2

	Mz OAM	Mz ODC	Mz OCLL	Ominex	Rubiales	Scravos	Southblend
%Vd	Temperatura °C						
IBP	1,4	2,7	20,3	42,1	198,5	0,6	0,4
10%	139,3	131,5	137,7	199,9	289,7	113,1	109,3
20%	220,1	209,1	219	278,7	334,4	166,4	167,2
30%	282,5	265,5	274,9	333,9	375,7	219	230,2
40%	335,9	312,9	322	386,9	416,6	258,5	286,4
50%	393	357,9	368,1	437,5	456,5	297,3	338,9
60%	448,4	408	415,4	488,3	504,9	338,9	398,4
70%	507,5	458,9	465,9	547,7		390,7	456
80%		532,5	537			446,5	523,5
90%						529,9	

Tabla 32. Destilación simulada de mezclas

Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
%Vdl	Temperatura °C									
IBP	23,5	24,6	24,7	24,4	-1,7	-3,2	20,9	25,8	25,6	53,5
10%	119,1	125,6	134,4	131,4	114,9	103	117,4	132,8	132,8	154,9
20%	175	182,7	206	194,7	174,2	164	179,9	192,7	196,2	217
30%	232,3	236	260,6	248,5	235	227,8	244	245,9	252	262,8
40%	280,3	283,6	307,4	293,4	284,5	275,5	295,2	289	298,6	302,9
50%	326,2	324,7	354,7	332,6	328,9	322,4	342,7	331,2	343,5	343,1
60%	377,1	369,6	403,6	379,1	378,6	372,5	396	379,8	391,7	386,7
70%	425,5	417,3	455,9	425,3	429,9	422,7	447,9	427,8	441,6	435,8
80%	480,4	465,6	528,4	477,3	492,6	481,2	515,1	482,7	506,1	495,7
90%		538,2		552,1						

Mezcla	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
%Vdl	Temperatura °C									
IBP	24,8	22,7	20,7	-0,4	0	23,5	21,1	21,1	23,3	23,3
10%	140	119,6	116,3	104	103,6	126,6	118,4	125,2	131,8	132
20%	207,5	180,1	173,6	161,7	151,5	187,9	177,7	185,8	192,4	192
30%	255	236,4	230,4	219,8	200,1	242	235,2	244,4	246,9	247
40%	297,8	284,1	272,6	266,8	248	288	286,7	294,3	294,3	294
50%	336,7	329,2	317,2	311,5	288	332,5	332,3	340,2	337,8	338
60%	380,2	379,4	367,8	359,9	334,1	383,5	385,8	391,2	387,5	388
70%	427,2	431,6	421,2	415,6	391,6	438,3	437,9	443,7	437,5	438
80%	481,4	494,8	477,7	476	453,8	505,2	499,8	508,8	499,3	499
90%										

Mezcla	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
%Vdl	Temperatura °C									
IBP	26,8	25,6	23,1	29,4	33,7	29,4	33,7	31,2	37,9	0,5
10%	116,9	116,5	103,7	116	125,1	116	125,1	132,4	172,9	88,2
20%	167,1	166,6	140,9	168,9	190,5	168,9	190,5	189	247,1	127,5
30%	219	216,7	181	227,4	249,2	227,4	249,2	239,7	299,9	173,4
40%	264,8	258,9	229,6	270,5	293,1	270,5	293,1	279,4	347,2	221,5
50%	309	296,7	268	314,2	337	314,2	337	316,2	397,6	264,6
60%	359,6	337,6	309,3	363,1	386,7	363,1	386,7	359,6	448,6	307,3
70%	419,2	386,9	363,4	420,1	439,8	420,1	439,8	409,6	507,2	355,5
80%	484,4	444,1	430,7	478,5	503,5	478,5	503,5	464,2		410,8
90%										

Mezcla	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
%Vol	Temperatura °C									
IBP	56,6	52,5	53,7	23,5	23,2	11,6	-0,3	21,7	37,9	26,4
10%	156,9	155,8	158,3	104,3	104,7	102,9	103,2	103,6	160,6	118,7
20%	224,7	229,5	234,5	144,3	147,6	142,8	149,1	142,3	236	170,8
30%	276,1	283,8	291,1	185,6	193,7	186,1	198,4	185	293,5	224,3
40%	323	330,2	341,7	231,4	237	234,4	248,5	234,2	343,3	268
50%	372,6	379,8	393,1	269,5	273,9	271,4	292,8	270,6	395,5	311,7
60%	424,1	430,7	445,8	310,3	315,1	315,4	337,4	314,3	448,4	361,8
70%	480,8	488,3	506,3	364	365,8	368,2	389,3	368	510,8	419,9
80%	558,7	566		430,5	427,9	431	447,9	434,1		482,6
90%				514,7	504,2	518,6	545,4	524,3		

Tabla 33. Caracterización de Mezclas

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		1	2	3	4	5
AZUFRE HORIBA	%Peso	0,406	0,543	0,726	0,647	0,545
DENSIDAD A 15°C	gmL	0,8581	0,8789	0,8971	0,8938	0,8748
GRAVEDAD API	GRAPI	33,3	29,4	26,1	26,7	30,2
Tabla de Cortes %Vol						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	1,8	1,7	1,5	1,6	3
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	5,7	5,1	4,3	4,5	5,8
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	7,3	7,1	6	6,7	6,9
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	8,6	8,3	6,9	7,7	7,5
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	9,2	9,6	8,2	9,1	8,9
249.0 - 315.0 ACPM LIVIANO	%Vol	14,6	15,6	14,2	15,5	14,4
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	11,4	12,5	11,7	12,7	11,7
371.0 - 427.0 DEST LIVIANO	%Vol	11,2	11,9	11,1	12	10,9
427.0 - 482.0 DEST MEDIO	%Vol	9,9	10,4	9,6	10,4	9,2
482.0 - 565.0 DEST PESADO	%Vol	9,2	10,4	9,9	10,8	9,1
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vol	10,5	6,9	15,9	8,4	12,1
% RECUPERADO (Volumen)	% Volumen	89,5	93,1	84,1	91,6	87,9
UV - VIS						
Monoaromáticos	% Peso	3,64	3,99	ND	ND	ND
Diaromáticos	% Peso	2,57	2,89	ND	ND	ND
Triaromáticos	% Peso	1,92	2,3	ND	ND	ND
Tetraaromáticos	% Peso	1,29	1,65	ND	ND	ND
Pentaaromáticos	% Peso	0,69	0,94	ND	ND	ND
Hexaaromáticos	% Peso	0,28	0,41	ND	ND	ND
Hepta+aromáticos	% Peso	0,85	1,36	ND	ND	ND

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		6	7	8	9	10
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,549	0,584	0,488	0,614	0,519
DENSIDAD A 15°C	gmL	0,8664	0,8794	0,8661	0,8794	0,8822
GRAVEDAD API	GR API	31,7	29,3	31,8	29,3	28,8
Tabla de Cortes %Vol						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vd	3,8	2,4	1,5	1,6	0,5
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vd	6,2	5,5	4,5	4,4	3
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vd	7,6	6,8	6,8	6,6	5,6
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vd	7,4	7,3	8,1	7,4	7,3
199.0 - 249.0 KERO	%Vd	8,5	8,3	9,3	8,8	9,8
249.0 - 315.0 ACPMLIVIANO	%Vd	14,2	13,5	15,2	14,6	16,6
315.0 - 371.0 ACPMPESADO	%Vd	11,4	10,9	12,4	12	13,3
371.0 - 427.0 DESTLMANO	%Vd	11	10,6	11,5	11,1	11,7
427.0 - 482.0 DESTMEDIO	%Vd	9,4	9,7	10,1	9,8	9,9
482.0 - 565.0 DESTPESADO	%Vd	8,7	10	7,5	7,8	8
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vd	11,1	14,3	12,6	15,4	13,9
% RECUPERADO(Volumen)	% Volumen	88,9	85,7	87,4	84,6	86,1
UV-VIS						
Monoaromáticos	% Peso	4,43	ND	4,12	ND	4,58
Diaromáticos	% Peso	3,12	ND	2,59	ND	2,65
Triaromáticos	% Peso	2,21	ND	1,91	ND	2,03
Tetraaromáticos	% Peso	1,44	ND	1,28	ND	1,31
Pentaaaromáticos	% Peso	0,8	ND	0,68	ND	0,72
Hexaaromáticos	% Peso	0,33	ND	0,28	ND	0,29
Hepta+aromáticos	% Peso	1,09	ND	0,83	ND	0,96

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		11	12	13	14	15
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,573	0,482	0,446	0,504	0,318
DENSIDAD A 15°C	gmL	0,8791	0,8781	0,8762	0,8773	0,8578
GRAVEDAD API	GR API	29,4	29,6	29,9	29,7	33,4
Tabla de Cortes %Vol						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vd	1,4	1,8	2,3	3,1	2,8
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vd	3,8	5,6	5,7	6,7	7,3
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vd	6,2	7,2	7,7	7,8	9,5
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vd	6,8	7,9	8,2	8,2	9,6
199.0 - 249.0 KERO	%Vd	9,3	9	9,4	9,3	10,6
249.0 - 315.0 ACPMLIVIANO	%Vd	16,6	14,9	15,4	15,1	15,6
315.0 - 371.0 ACPMPESADO	%Vd	13,4	11,6	11,5	11,4	10,6
371.0 - 427.0 DESTLMANO	%Vd	11,9	10,6	10,4	9,9	9
427.0 - 482.0 DESTMEDIO	%Vd	10,1	9,3	9,3	8,7	8,2
482.0 - 565.0 DESTPESADO	%Vd	7,8	7,2	6,9	6,6	5,9
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vd	12,1	14,4	12,5	12,7	10,3
% RECUPERADO(Volumen)	% Volumen	87,9	85,6	87,5	87,3	89,7

UV-VIS						
Monoaromáticos	% Peso	ND	4,5	ND	ND	4,28
Diaromáticos	% Peso	ND	3,12	ND	ND	2,61
Triaromáticos	% Peso	ND	2,29	ND	ND	1,78
Tetraaromáticos	% Peso	ND	1,56	ND	ND	1,19
Pentaaromáticos	% Peso	ND	0,88	ND	ND	0,67
Hexaaromáticos	% Peso	ND	0,38	ND	ND	0,3
Hepta+aromáticos	% Peso	ND	1,22	ND	ND	0,92

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		16	17	18	19	20
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,508	0,529	0,594	0,508	0,504
DENSIDAD A 15°C	g/mL	0,882	0,8727	0,8823	0,8774	0,877
GRAVEDAD API	GR API	28,8	30,6	28,8	29,7	29,8
Tabla de Cortes %Vol.						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	1,7	2,1	1,9	1,6	1,6
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	4,8	5,6	5,1	4,4	6,3
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	7,1	7,1	6,9	6,8	8,8
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	7,9	8,1	7,8	8	9
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	9,2	8,9	8,7	9,1	9,8
249.0 - 315.0 ACPM LLIANO	%Vol	14,7	13,7	14	14,5	15,2
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	11,6	11,2	11,3	11,8	10,8
371.0 - 427.0 DEST LLIANO	%Vol	10,4	10,6	10,6	11,2	9,3
427.0 - 482.0 DEST MEDIO	%Vol	9,1	9,7	9,5	9,8	8,4
482.0 - 565.0 DEST PESADO	%Vol	7,5	10,2	10,4	10,1	6,6
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vol	15,4	12,1	13,2	12,1	14,2
%RECUPERADO(Volumen)	% Volumen	84,6	87,9	86,8	87,9	86,3
UV-VIS						
Monoaromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	4,57
Diaromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	2,89
Triaromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	2,06
Tetraaromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	1,37
Pentaaromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	0,79
Hexaaromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	0,34
Hepta+aromáticos	% Peso	ND	ND	ND	ND	1,17

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		21	22	23	24	25
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,538	0,319	0,252	0,457	0,563
DENSIDAD A 15°C	g/mL	0,8614	0,8579	0,8537	0,8863	0,8999
GRAVEDAD API	GR API	32,7	33,4	34,2	28,1	25,7
Tabla de Cortes %Vol						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	2,5	2,5	2	1,6	0,9
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	9,1	9,1	8,2	6,8	5,7
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	11	11,1	10,6	8,3	7,1
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	10,2	10,4	10,2	8,1	7,1
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	10,9	11,1	10,9	9,3	8,6
249.0 - 315.0 ACPM LLIANO	%Vol	16,7	16,4	16,5	15,7	15,2
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	10,3	10,2	10,8	11,2	11,9
371.0 - 427.0 DESTLIANO	%Vol	8,3	8,2	9,1	9,8	10,5
427.0 - 482.0 DESTMEDIO	%Vol	7,9	7,6	8	9,1	9,8
482.0 - 565.0 DESTPESADO	%Vol	5,1	4,8	6,8	7	8
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vol	8	8,6	6,9	13,1	15,2
% RECUPERADO (Volumen)	% Volumen	92,5	91,9	93,6	87,4	85,4
UV - VIS						
Monoaromáticos	% Peso	5,08	5,44	4,71	4,72	4,69
Diaromáticos	% Peso	2,86	2,98	2,73	2,7	2,75
Triaromáticos	% Peso	1,83	1,73	1,66	1,89	2,16
Tetraaromáticos	% Peso	1,18	0,89	0,99	1,37	1,69
Pentaaromáticos	% Peso	0,64	0,47	0,54	0,78	1,01
Hexaaromáticos	% Peso	0,25	0,18	0,24	0,34	0,46
Hepta-aromáticos	% Peso	0,8	0,54	0,69	1,12	1,65

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		26	27	28	29	30
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,518	1,077	0,207	0,751	0,858
DENSIDAD A 15°C	g/mL	0,8736	0,9165	0,836	0,9025	0,9122
GRAVEDAD API	GR API	30,4	22,8	37,7	25,2	23,5
Tabla de Cortes %Vol						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	0,9	0,5	4,9	0,1	0,2
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	4,8	2,7	9,2	2,8	3,4
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	7,3	4,3	11,4	5,9	5,3
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	8,1	5,2	9,6	6,9	6,2
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	10,4	7,2	10,4	8,3	7,7
249.0 - 315.0 ACPM LLIANO	%Vol	17,5	13,2	15,8	13,7	13,4
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	12,9	11,3	11,4	11,4	11,4
371.0 - 427.0 DESTLIANO	%Vol	10,8	10,9	9,5	10,9	11
427.0 - 482.0 DESTMEDIO	%Vol	9,2	10,3	7,1	9,7	9,8
482.0 - 565.0 DESTPESADO	%Vol	7,3	10,7	4,9	10,6	10,8

565.0-FBP FONDO VACIO	%Vol	10,8	23,7	5,8	19,7	20,8
% RECUPERADO(Volumen)	% Volumen	89,8	76,7	94,7	80,9	80

UV-VIS

Monoaromáticos	% Peso	5,06	5,07	5,17	4,16	4,59
Diaromáticos	% Peso	2,66	3,07	2,81	2,96	3,28
Triaromáticos	% Peso	1,64	2,49	1,62	2,61	2,9
Tetraaromáticos	% Peso	0,94	1,93	0,83	1,99	2,22
Pentaaromáticos	% Peso	0,46	1,03	0,42	1,17	1,31
Hexaaromáticos	% Peso	0,16	0,39	0,16	0,53	0,58
Hepta+aromáticos	% Peso	0,47	1,33	0,43	1,82	2,08

NÚMERO DE MEZCLA

PROPIEDAD	UNIDAD	31	32	33	34	35
AZUFRE HORIBA	% Peso	1,026	0,175	0,208	0,188	0,311
DENSIDAD A 15°C	g/mL	0,9128	0,8524	0,8544	0,8481	0,8492
GRAVEDAD API	GR API	23,4	34,4	34	35,3	35

Tabla de Cortes %Vol

IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	0,2	1,8	1,8	2,8	3,7
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	3,3	8,9	8,7	8,8	7,1
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	5,2	11,1	10,2	10,6	9,8
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	5,9	10,8	10,2	10,1	9
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	7,3	11,2	11,2	10,9	10
249.0 - 315.0 ACPM LLMANO	%Vol	12,5	16,7	17,2	16,2	15,2
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	10,8	10,3	11,1	10,6	11,4
371.0 - 427.0 DEST LLMANO	%Vol	10,6	8,3	8,8	8,9	9,9
427.0 - 482.0 DEST MEDIO	%Vol	10	7,8	8,2	7,6	7,8
482.0 - 565.0 DEST PESADO	%Vol	11,6	6,1	6,1	6	7
565.0-FBP FONDO VACIO	%Vol	22,6	7	6,5	7,5	9,1
% RECUPERADO(Volumen)	% Volumen	78,1	93,4	94,2	93,1	91,5

UV-VIS

Monoaromáticos	% Peso	4,56	4,87	5,21	4,89	4,52
Diaromáticos	% Peso	3,06	2,74	2,77	2,88	2,76
Triaromáticos	% Peso	2,71	1,51	1,45	1,66	1,86
Tetraaromáticos	% Peso	2,25	0,88	0,76	0,94	1,13
Pentaaromáticos	% Peso	1,28	0,48	0,39	0,51	0,62
Hexaaromáticos	% Peso	0,56	0,2	0,14	0,21	0,25
Hepta+aromáticos	% Peso	1,87	0,58	0,42	0,61	0,81

PROPIEDAD	UNIDAD	NÚMERO DE MEZCLA				
		36	37	38	39	40
AZUFRE HORIBA	% Peso	0,249	0,918	0,743	0,321	0,438
DENSIDAD A 15°C	g/mL	0,8583	0,9049	0,8974	0,8615	0,8749
GRAVEDAD API	GR API	33,3	24,8	26,1	32,7	30,1
Tabla de Cortes %Vol						
IBP - 60.0 NAFTA 1	%Vol	2,2	0,4	0,2	1,8	1,4
60.0 - 107.0 NAFTA 2	%Vol	9,4	3,2	3,4	8	6,3
107.0 - 152.0 NAFTA 3	%Vol	10,8	5	5,8	10,3	8,5
152.0 - 199.0 NAFTA 4	%Vol	10,2	5,6	6,9	10	8,8
199.0 - 249.0 KERO	%Vol	10,9	7,4	8,6	10,7	9,8
249.0 - 315.0 ACPM LIVIANO	%Vol	16,4	12,6	14,1	16,4	15,6
315.0 - 371.0 ACPM PESADO	%Vol	10,2	10,8	11,4	10,4	10,8
371.0 - 427.0 DEST LIVIANO	%Vol	8,4	10,5	10,7	8,7	9,6
427.0 - 482.0 DEST MEDIO	%Vol	7,9	9,8	9,6	8,2	8,6
482.0 - 565.0 DEST PESADO	%Vol	5,8	11,3	10,6	6,7	8
565.0 - FBP FONDO VACIO	%Vol	7,8	23,4	18,7	8,8	12,6
% RECUPERADO (Volumen)	% Volumen	92,6	77,2	82	91,8	88
UV - VIS						
Monoaromáticos	% Peso	5,76	4,98	4,24	5,47	5,21
Diaromáticos	% Peso	3,33	3,46	3,01	3,25	3,33
Triaromáticos	% Peso	1,89	3,07	2,63	2	2,38
Tetraaromáticos	% Peso	1,12	2,4	2	1,26	1,62
Pentaaromáticos	% Peso	0,61	1,36	1,16	0,7	0,93
Hexaaromáticos	% Peso	0,26	0,62	0,52	0,31	0,4
Hepta+aromáticos	% Peso	0,75	1,96	1,74	0,93	1,35

ANEXO D.

CORRELACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Se creó una matriz con todos los datos obtenidos en la experimentación y con los análisis fisicoquímicos que fue posible realizar a cada uno de los crudos y mezclas de crudos, siendo así los constituyentes de la matriz:

- Cortes de destilación simulada
- Densidad a 15 °C
- Gravedad API
- Tipo de carbón por espectrofotometría
- PS
- PI
- P

El tratamiento realizado a los datos fue el siguiente:

- Los datos se agruparon utilizando el software NCSS – PASS (K – Means Clustering)
- Con el software UNSCRAMBLER se construyó el modelo de cada una de las agrupaciones y de la matriz general utilizando el programa PLS (Partial Least Square Regression).

En las gráficas siguientes se mostrarán el modelo desarrollado y la distribución de los datos para cada uno de ellos, que se encontró para los crudos y mezclas de crudos.

Tabla 34. Agrupación 1

COMPONENTES	DISTANCIA 1	DISTANCIA 2	DISTANCIA 3
CRUDO ABO	4,5093	12,2221	8,5651
CRUDO CUSIANA	5,6854	12,3651	9,4394
CRUDO SCRAVOS	4,0114	8,6416	5,5701
10% RUBIALES + 90% ABO	1,9109	8,7063	4,7698
15% Mz OCLL + 85% CUSIANA	2,1637	9,0894	5,2509
20% CAÑO LIMÓN + 80% ABO	2,6509	8,7513	4,9013
25% CALYPSO + 75% ABO	1,6811	9,0967	4,7443
30% CAÑO LIMÓN + 20% CUSIANA + 50% ABO	1,2694	8,7333	4,5244
45% CAÑO LIMÓN + 55% CUSIANA	2,3543	7,3452	2,9587
15% Mz ODC + 20% CAÑO LIMÓN + 65% ABO	4,7671	8,1900	5,9987
50% Cano Limon, 50% ABO	2,7417	7,3121	3,2834

Tabla 35. Agrupación 2

COMPONENTES	DISTANCIA 1	DISTANCIA 2	DISTANCIA 3
Mz AYACUCHO	7,5383	4,0771	5,2107
Mz AYACUCHO (m9)	11,2620	3,5217	8,2162
Mz OAM	8,4166	2,3831	5,9812
Mz ODC	8,4166	2,3831	5,9812
Mz OCLL	8,8382	2,3179	5,4497
OMIMEX	11,1754	3,4849	8,1504
RUBIALES	15,5669	7,5669	11,551
SOUTHBLEND	6,2193	3,5444	4,6066
30% CALYPSO + 30% Mz OAM + 40% OMIMEX	8,1072	2,3564	4,8307
10% MS AYACUCHO + 60% CAÑO LIMÓN + 30% MS OCLL	7,3674	2,6186	3,4262
15% MS AYACUCHO + 35% CAÑO LIMÓN + 50% ABO	8,3069	1,2509	4,6851
46% MS AYACUCHO + 34% CAÑO LIMÓN + 20% MS OCLL	8,4413	1,2277	4,9746
33% MS AYACUCHO + 30% MS ODC + 47% CAÑO LIMÓN	8,7167	1,4369	5,5957
10% Mz AYACUCHO + 60% CAÑO LIMÓN + 30% Mz ODC	7,0195	2,5679	3,1648

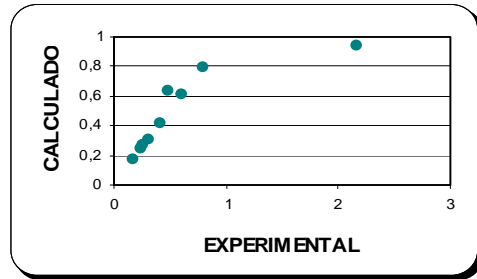
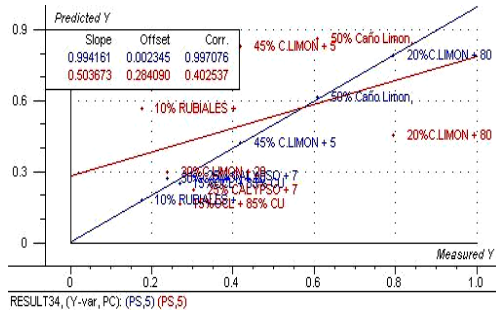
Tabla 36. Agrupación 3

COMPONENTES	DISTANCIA 1	DISTANCIA 2	DISTANCIA 3
CALYPSO	6,8231	7,5601	4,3143
CAÑO LIMÓN	6,2515	4,6142	2,2357
CAÑO LIMÓN NUEVO	6,1832	4,6809	2,2314
25% Mz OCLL + 30% CAÑO LIMÓN + 45% ABO	3,4444	5,8093	2,2427
30% RUBIALES + 70% ABO	4,0931	6,2707	2,2715
40% RUBIALES + 60% ABO	5,8022	4,3294	2,0623
70% CALYPSO + 30% ABO	4,1907	7,4708	2,8517
30% Mz ODC + 35% CAÑO LIMÓN + 35% ABO	4,2729	4,9926	3,0229
60% MZ AYACUCHO + 40% CAÑO LIMÓN	5,0169	6,4471	2,2472
30% Mz ODC + 30% MZ AYACUCHO + 40% CAÑO LIMÓN	5,8489	5,4428	2,0749
40% ODC + 45% Mz AYACUCHO + 15% CUSIANA	4,5533	5,1229	2,0156
40% Mz AYACUCHO + 30% CAÑO LIMÓN + 30% CALYPSO	5,0787	6,3354	1,8365
40% CAÑO LIMÓN + 60% CALYPSO	5,8183	5,9359	2,0838
50% Mz ODC + 15% Mz AYACUCHO + 16% CAÑO LIMÓN + 19% SCRAVOS	5,0472	4,3215	1,9372

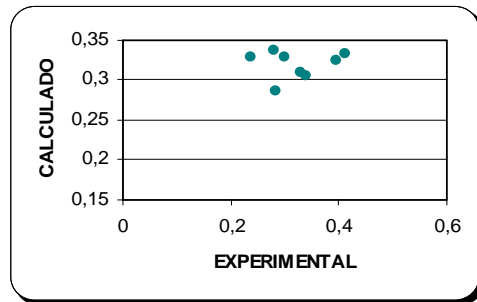
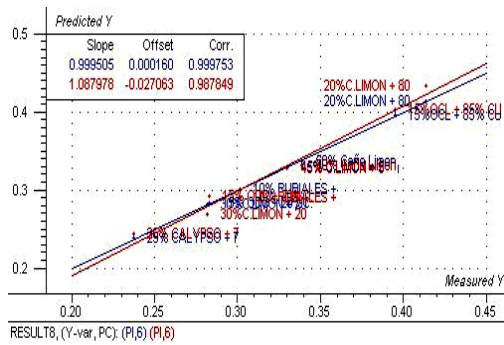
GRUPO 1.

Figura 40. Parámetros de Estabilidad Grupo 1

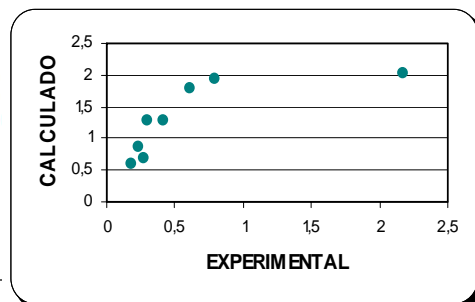
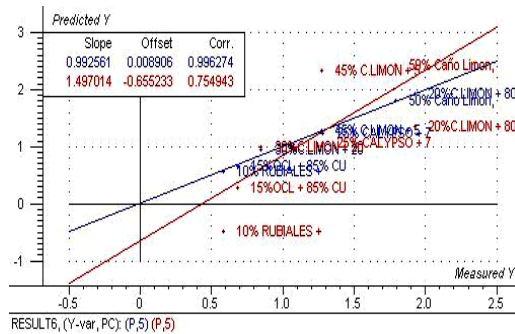
PS



PI



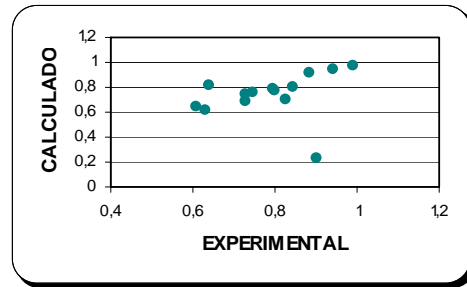
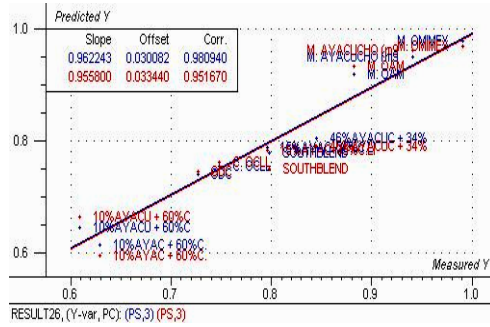
P



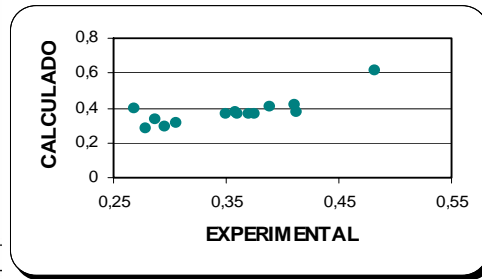
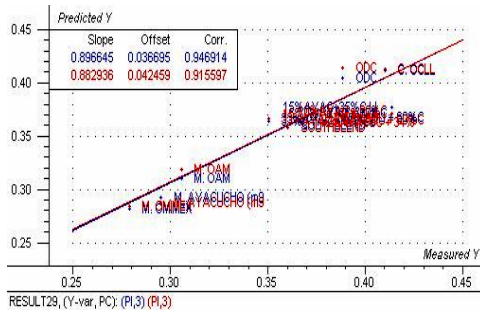
GRUPO 2.

Figura 41. Parámetros de Estabilidad Grupo 2

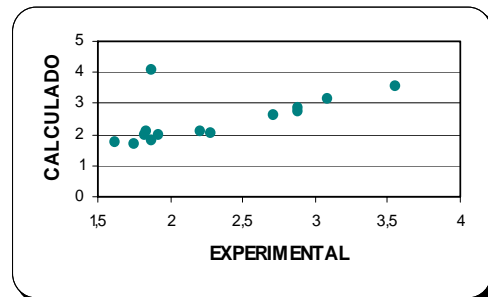
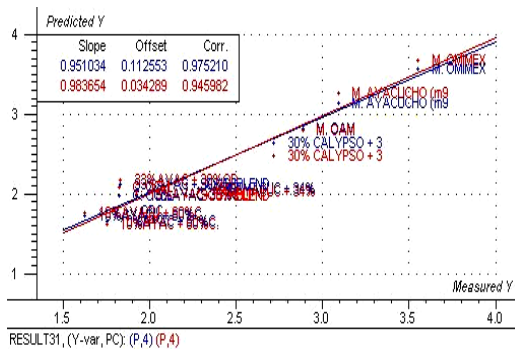
PS



PI



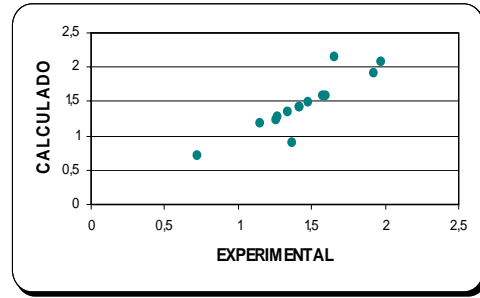
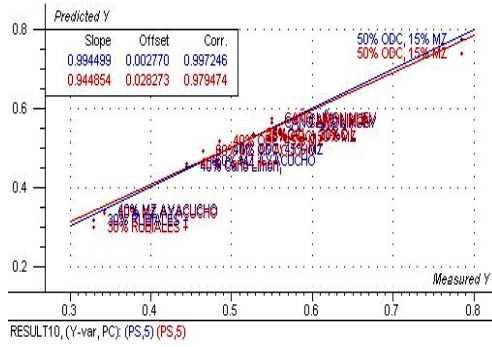
P



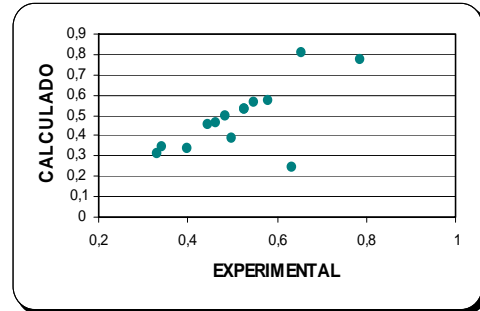
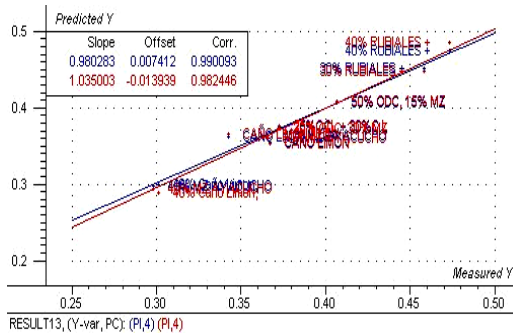
GRUPO 3.

Figura 42. Parámetros de Estabilidad Grupo 3

PS



PI



P

