

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE
MEZCLAS DE CRUDOS BASADO EN EL CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE
SOLUBILIDAD POR SEUDO-COMPONENTES**

Autor:

CÉSAR ALFREDO PEREIRA GUTIÉRREZ.

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

2010

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE
MEZCLAS DE CRUDOS BASADO EN EL CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE
SOLUBILIDAD POR SEUDO-COMPONENTES**

Trabajo de Maestría
Para optar al Título de Magister en Ingeniería Química

Autor:

CÉSAR ALFREDO PEREIRA GUTIÉRREZ.

Directores:

Dr. VIATCHESLAV KAFAROV
Universidad Industrial de Santander

MSc. HECTOR JULIO PICÓN
Instituto Colombiano del Petróleo

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

2010

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Santísima Virgen por las bendiciones y sabiduría que me han proporcionado a lo largo de toda mi existencia.

A mi novia Dayana que con su incondicional apoyo me ha fortalecido a lo largo de nuestra relación.

A mi familia y amigos por su compañía y solidaridad en el desarrollo de esta meta tan anhelada.

A mis directores Viatcheslav Kafarov y Hector Picón por la oportunidad y apoyo profesional en la realización de la investigación.

A Jesús Alberto Castro por sus sabios consejos que me han aportado significativamente en mi formación académica y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN. | 10 |
| INTRODUCCIÓN. | 12 |
| ALCANCE DEL PRESENTE ESTUDIO. | 16 |
| 1. BASES CONCEPTUALES | 17 |
| 1.1 Parámetro de Solubilidad de Scatchard - Hildebrand, δ . | 17 |
| 1.1.1 <i>Calor de Vaporización.</i> | 17 |
| 1.1.2 <i>Parámetro de Solubilidad para Mezclas de Multicomponentes.</i> | 18 |
| 1.2 Parámetro de Solubilidad de Flocculación, δf . | 18 |
| 1.3 Modelos de Estabilidad de Crudos Basados en el Parámetro de Solubilidad. | 20 |
| 1.3.1 <i>Modelo de Andersen y Pedersen.</i> | 20 |
| 1.3.2 <i>Modelo de Wiehe.</i> | 20 |
| 1.4 Determinación de Parámetros de Estabilidad de Crudos. | 22 |
| 1.4.1 <i>Método Manual de Heithaus.</i> | 22 |
| 1.4.2 <i>Método Automático (P-Value, Po/FRmax).</i> | 23 |
| 1.4.2.1 <i>Método P-Value.</i> | 24 |
| 1.4.2.2 <i>Método Po/FRmax</i> | 25 |
| 1.5 Funciones de Distribución de Probabilidad para el Ajuste de Curvas de Destilación de Crudos. | 26 |
| 1.6 Trazador Cubico para la Representación Continua de la Curva de Destilación de Crudos. | 29 |
| 1.6.1 <i>Trazador Cubico Natural.</i> | 29 |
| 1.6.2 <i>Trazador Cubico Sujeto</i> | 29 |
| 1.7 Factor de Caracterización de Watson Kw. | 30 |
| 2. METODOLOGÍA. | 31 |
| 2.1 Determinación de Curvas de Destilación TBP de Crudos. | 31 |
| 2.2 Caracterización Físico-Química de Las Fracciones. | 32 |
| 2.3 Determinación de Parámetros de Solubilidad de Crudos y Mezclas. | 32 |
| 2.3.1 <i>Método Manual IEC.</i> | 33 |
| 2.3.2 <i>Método Automático P-Value.</i> | 34 |
| 2.3.3 <i>Método Po/FRmax.</i> | 34 |
| 2.4 Desarrollo del Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos. | 34 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.4.1 | <i>Evaluación de Funciones de Distribución de Probabilidad para Ajuste de la Curva de Destilación TBP.</i> | 35 |
| 2.4.1.1 | <i>Representación Continua de la curva TBP.</i> | 35 |
| 2.4.1.2 | <i>Estudio de la Capacidad Predictiva de las funciones de Probabilidad.</i> | 36 |
| 2.4.1.3 | <i>Análisis de Funciones de Probabilidad para Extrapolación de la Curva TBP.</i> | 37 |
| 2.4.2 | <i>Generación de Pseudocomponentes a partir de la Curva TPB del Crudo.</i> | 37 |
| 2.4.2.1 | <i>Estimación de Propiedades de Pseudocomponentes.</i> | 38 |
| 2.5 | Modelo para Predecir la Estabilidad de Mezclas a Partir del Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos. | 41 |
| 2.5 | Validación del Modelo Propuesto a Partir de Datos Experimentales. | 41 |
| 3. | ANÁLISIS DE RESULTADOS. | 42 |
| 3.1 | Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos. | 42 |
| 3.1.1 | <i>Evaluación de Funciones de Distribución de Probabilidad para Ajuste de la Curva de Destilación TBP.</i> | 42 |
| 3.1.1.1 | <i>Estudio de la Capacidad Predictiva de las funciones de Probabilidad.</i> | 42 |
| 3.1.1.2 | <i>Análisis de Funciones de Probabilidad para Extrapolación de la Curva TBP</i> | 49 |
| 3.1.2 | <i>Propiedades y Parámetro de Solubilidad de Pseudocomponentes.</i> | 50 |
| 3.2 | Estimación de Parámetros de Solubilidad por el Método IEC. | 52 |
| 3.3 | Modelo para Predecir Estabilidad de Mezclas a Partir del Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos. | 55 |
| 4. | CONCLUSIONES. | 59 |
| | BIBLIOGRAFÍA. | 60 |
| | ANEXOS | 64 |
| | ANEXO 1 | 65 |
| | ANEXO 2 | 67 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Solubilidad de Solventes y Parámetro de Floculación del Crudo Souedie | 19 |
| Figura 2 | Línea de Estabilidad de Heithaus | 23 |
| Figura 3 | Detección del Onset de Floculación en el Analizador Zemantra | 24 |
| Figura 4 | Línea de Estabilidad en el Equipo Zematra. | 26 |
| Figura 5 | Parámetro de Solubilidad del c8+ en Función del factor Kw | 30 |
| Figura 6 | Esquema de Destilación de Crudos | 31 |
| Figura 7 | Metodología Experimental para Determinación de Parámetros de Solubilidad | 33 |
| Figura 8 | Representación Grafica de Pseudocomponentes. | 38 |
| Figura 9 | Modelo para Predecir Estabilidad de Mezclas a Partir del Parámetro de Solubilidad. | 41 |
| Figura 10 | TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Alfa 2 | 42 |
| Figura 11 | Desviación TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Alfa 2 | 43 |
| Figura 12 | TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Gambel 2 | 43 |
| Figura 13 | Desviación TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Gambel 2 | 44 |
| Figura 14 | TBP Real Vs TBP Calculada, Crudo M, Función Weibull Extreme 4 | 44 |
| Figura 15 | TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Weibull Extreme 4 | 45 |
| Figura 16 | Funciones de Probabilidad para Ajuste de TBP, Ranking con R2. | 46 |
| Figura 17 | Funciones de Probabilidad para Ajuste de TBP, Ranking con AIC. | 47 |
| Figura 18 | Funciones de Probabilidad para Ajuste de TBP, Ranking con BIC. | 48 |
| Figura 19 | Funciones de Probabilidad para Extrapolación de TBP, R2 Zona Incompleta. | 49 |
| Figura 20 | Funciones de Probabilidad para Extrapolación de TBP, R2 Total Puntos TBP. | 50 |
| Figura 21 | Línea de Estabilidad Crudo E | 52 |
| Figura 22 | Grafica de Paridad "PS Calculado vs PS Laboratorio" | 54 |
| Figura 23 | Grafica de Paridad Mezclas, PS Calculado vs PS Laboratorio | 57 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | Parámetros de Estabilidad de Heithaus | 22 |
| Tabla 2 | Mezclas Estándar para la determinación de Po/FRmax. | 25 |
| Tabla 3 | Funciones de Distribución de Probabilidad Analizadas. | 27 |
| Tabla 4 | Propiedades Físico-Químicas y Métodos de Caracterización. | 32 |
| Tabla 5 | Metodología de Análisis de Regresión para Ajuste de δ | 40 |
| Tabla 6 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo M | 51 |
| Tabla 7 | Cálculo del Ci y FRi para el Crudo E – Método IEC | 52 |
| Tabla 8 | Parámetros de Solubilidad, Modelo Pseudocomponentes vs IEC. | 53 |
| Tabla 9 | Repetibilidad y Reproducibilidad del Método Heithaus | 54 |
| Tabla 10 | Solubilidad de Mezclas Evaluadas, Modelo vs Experimental. | 56 |
| Tabla 11 | Clasificación por Estabilidad de las Mezclas Evaluadas. | 57 |
| Tabla 12 | Análisis de Proporción Óptima de Mezclado para Estabilidad de la Mezcla 4 | 58 |
| Tabla 13 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo Q. | 67 |
| Tabla 14 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo R. | 68 |
| Tabla 15 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo T. | 69 |
| Tabla 16 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo N. | 70 |
| Tabla 17 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo V. | 71 |
| Tabla 18 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo U. | 72 |
| Tabla 19 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo B. | 73 |
| Tabla 20 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo O. | 74 |
| Tabla 21 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo L. | 75 |
| Tabla 22 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo K. | 76 |
| Tabla 23 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo S. | 77 |
| Tabla 24 | Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo J. | 78 |

RESUMEN

TITULO: Desarrollo de un Modelo para la Evaluación de Estabilidad de Mezclas de Crudos Basado en el Cálculo del Parámetro de Solubilidad por Seudo-Componentes*

AUTOR: César Alfredo Pereira Gutiérrez**

PALABRAS CLAVES: Parámetro de Solubilidad, Solubilidad Disponible, Solubilidad Requerida, Compatibilidad.

DESCRIPCIÓN:

El propósito de este estudio fue desarrollar una metodología para generar rápidamente criterios de estabilidad en la obtención de mezclas optimas, basado en la estimación del parámetro de solubilidad de crudos.

Inicialmente se desarrolló un modelo de cálculo para estimar el parámetro de solubilidad de crudos, a partir de la densidad y curva de destilación TBP. Posteriormente se generó un modelo de estabilidad de mezclas, con base en los parámetros de solubilidad disponible y solubilidad requerida de crudos. Para validar el modelo se determino experimentalmente la estabilidad de 24 crudos, utilizando una adecuación de la metodología Heithaus, a la que denominamos método IEC.

El modelo de cálculo del parámetro de solubilidad de crudos δ , se basa en la generación y calculo de pseudocomponentes, estimando el crudo como la mezcla total de ellos.

Para garantizar la representación continua y extrapolación de las curvas de destilación, se evaluaron 27 funciones de distribución de probabilidad mediante el algoritmo de optimización de Marquardt. De acuerdo a criterios estadísticos de comparación, se clasificaron para encontrar la mejor función para el modelo, siendo las más eficientes las funciones Weibull Streme y Riazi de cuatro parámetros.

La desviación de los datos calculados de solubilidad disponible, estuvieron por debajo de la repetibilidad o desviación permisible del método experimental IEC, lo que hace suponer el éxito del modelo.

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingeniería Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Directores: Viatcheslav Kafarov, Hector Picón.

ABSTRAC

TITLE: A Develop Model for the Evaluation of Stability of the Mixture of Oils Based on the Calculus Solubility Parameters for Seudo-Compounds*

AUTOR: César Alfredo Pereira Gutiérrez**

KEYWORDS: Solubility Parameters, Availability Solubility, Required Solubility, Compatibility.

DESCRIPTION:

The purpose of this study is to develop a methology to generate fast stability criteria to obtain optimal mixtures, based on estimated solubility of the oil parameters.

Initially we develop a calculus model to estimate the parameter of the solubility of the oil, parting from the density and the distillation loop TBP. Subsequently we generated a stability model of mixtures, based on the solubility parameters availability and required solubility of the oil. To validate the model we determent to experiment the stability on 24 oils, utilizing a adequacy of the Heithaus methology, which we nominate the IEC method.

The calculus model of the solubility parameter of the oil δ , was based on the generation and pseudo components calculation, estimating the oil like all of the total mixture of them.

To guaranty the continues presence and the extrapolation of the distillation curve, there were 27 distribution functions evaluated of provability throughout the optimization algorithm of Marquardt. According to statistical comparison criteria, there were classify to find the better function to the model, having the most efficient functions Weibull Streme and Reazi of 4 parameters. The deviation of the calculated data of the available solubility, where below the repeatability or the permitted deviation of the experimental method IEC, which it make us believe the success of the model.

*Graduate Project

**Faculty of Phisical-Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, Directors: Viatcheslav Kafarov, Hector Picón.

INTRODUCCIÓN

Los componentes de un crudo se pueden dividir en varias clases de acuerdo a su polaridad creciente en: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. Los asfaltenos son definidos como la fracción del crudo que es soluble en tolueno e insoluble en un alcano, usualmente pentano o heptano. Los asfaltenos son moléculas polares con alto peso molecular, que usualmente se presentan en crudos pesados en estado coloidal, pero pueden ser parcialmente precipitados cuando las propiedades de solubilidad cambian al realizar mezclas de crudos, o por cambios de temperatura o presión [16].

Para el procesamiento de los crudos se realizan mezclas que originan sinergias positivas que favorecen rendimientos y calidades de productos. Sin embargo, también se pueden dar sinergias negativas que generen inestabilidad en las mezclas, favoreciendo la precipitación de asfaltenos [8].

Dentro de la cadena productiva del petróleo, los asfaltenos pueden precipitar fácilmente y alterar negativamente la eficiencia en los procesos de producción, transporte y almacenamiento de crudos [33]. La precipitación de asfaltenos en mezclas de crudos es el resultado de la interacción de compuestos que no son mutuamente solubles [14].

A nivel mundial, el costo asociado con la deposición de asfaltenos durante la producción y procesamiento, es del orden de billones de dólares por año. Por esta razón, la prevención o mitigación de la precipitación de asfaltenos es la principal meta para muchas compañías petroleras. En particular, un método rápido y confiable para predecir la estabilidad de mezclas está siendo muy necesario. Una forma fácil de examinar problemas de estabilidad por incompatibilidad de crudos en la formación de mezclas, es a partir del parámetro de solubilidad [31].

Este concepto, originalmente desarrollado por Hildebrand [15] y ampliado por Hensen [4], está siendo usado extensivamente para estudiar las interacciones moleculares en muchos compuestos, incluyendo asfaltenos, crudos y sus fracciones. El parámetro de solubilidad está directamente relacionado con la energía cohesiva, y volumen molar en fase líquida, para sustancias puras [29]. Dos sustancias con parámetros similares ganan suficiente energía en la dispersión mutua que les permite mezclarse. Contrariamente, dos sustancias con parámetros diferentes requieren más energía para dispersarse, energía que es absorbida por la mezcla, pudiendo llegar a ser inmiscibles [4].

Para mezclas complejas, la distribución de parámetros de solubilidad, también conocida como perfiles de solubilidad, está siendo muy utilizada para estudiar la estabilidad de mezclas. Existen dos métodos para la obtención de los perfiles de solubilidad: estudios de miscibilidad [20] y esquemas de precipitación [1]. Las dos metodologías requieren grandes cantidades de solvente y periodos largos de tiempo para su ejecución.

En julio de 2010, un nuevo método analítico fue publicado para determinar el perfil de solubilidad de asfaltenos para diferentes sustancias. Este método usa una columna de precipitación, requiere pequeñas cantidades de muestra y la prueba toma alrededor 35 minutos de duración [31].

Otro modelo para evaluar la estabilidad de mezclas de crudos basados en el parámetro de solubilidad, es el modelo de Andersen y Pedersen (1999) [2], ampliado por Wiehe en el año 2000 [41]. Este se basa en una la titulación de crudos utilizando tolueno como solvente y n-heptano como agente precipitante. Al encontrar el onset de precipitación, el modelo tiene en cuenta la relación de volúmenes de solvente, precipitante y crudo, para el cálculo tanto de la solubilidad disponible, como de la solubilidad requerida para la disolución de los asfaltenos. El modelo utiliza como criterio de estabilidad $PS > PI$ (solubilidad disponible mayor que solubilidad requerida) [33].

Si bien los modelos basados en el parámetro de solubilidad para evaluar estabilidad de mezclas, han arrojado buenos resultados, son procedimientos experimentales que requieren muestras de crudos, volúmenes de sustancias solventes y precipitantes, y aun más, pueden llegar a necesitar periodos largos de tiempo para su ejecución.

Con el propósito de predecir el parámetro de solubilidad de crudos, se han realizado algunos estudios, uno de ellos es el propuesto por Wang and Bukley [39]. Ellos proponen una correlación para el cálculo del parámetro de solubilidad a condición ambiente en función del índice de refracción a 20°C, generando una relación directa entre esta propiedad y la densidad para hidrocarburos líquidos. Esta relación entre el parámetro de solubilidad y la densidad puede llegar a ser eficiente para algunos intervalos de densidad, pero ineficiente para otros [37].

Igualmente, ellos proponen una nueva regla de mezcla para el parámetro de solubilidad. Esta es una extensión de la ecuación de Scatchard-Hildebrand para mezclas, utilizada en la teoría de soluciones regulares [28]. La efectividad de la nueva regla de mezcla depende de la exactitud de las propiedades molares parciales de los diferentes componentes de la mezcla [37].

Se ha comprobado una relación directa entre el parámetro de solubilidad y la densidad [39]. El factor de caracterización de Watson se puede definir de dos formas consecuentes: una primera como la relación entre la temperatura media de ebullición y la gravedad específica, y una segunda como una medida de la densidad ligada a la relación H/C (hidrogeno carbono) [40]. La relación H/C determina el carácter químico de una sustancia que puede ir desde aromático, naftenico, parafinico, hasta iso-parafinico, relacionada con una tendencia ascendente del factor de caracterización [29]. De esta forma se puede deducir que, más que con la densidad, el parámetro de solubilidad tiene una relación más directa con el factor de caracterización de Watson, siendo las sustancias con mayor carácter aromático, las de mejor poder de solvencia.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo para estimar el parámetro de solubilidad de crudos, basado en la generación y cálculo de pseudocomponentes a partir de la densidad y curva de destilación TBP de crudos. Además se generó un modelo para evaluar estabilidad de mezclas, a partir del parámetro de solubilidad estimado. El modelo servirá como base en la generación de mezclas óptimas, llegando a ser la estabilidad una variable importante dentro del proceso de optimización de dietas.

Al ser el modelo función de la curva de destilación TBP, es necesario garantizar la representación continua y extrapolación de las curvas de destilación.

Puesto que las curvas de destilación están formadas por un número finito de datos temperatura – volumen, estos pueden ser ajustados a diferentes funciones con el fin de generar una representación continua [34]. Regresiones polinomiales, el interpolador de Lagrange y el trazador cúbico [6], son herramientas que están siendo usadas para la interpolación de puntos a lo largo de la curva de destilación. Otras aproximaciones, las cuales ofrecen más exactitud en la representación continua de la curva, son las funciones de distribución de probabilidad.

En este trabajo se evaluaron 27 funciones de distribución de probabilidad utilizadas en la industria del petróleo [34], usando el algoritmo de optimización de Marquardt [21]. A partir de indicadores estadísticos de comparación como el AIC y el BIC, se clasificaron las funciones de acuerdo a su eficiencia en el ajuste de curvas. Estos indicadores operacionales consideran tanto la complejidad de un modelo, como la eficiencia en el ajuste de los datos [7].

Para validar el modelo de cálculo del parámetro de solubilidad se utilizó la metodología experimental Heithaus. Este es un método estándar de titulación automática, con la designación ASTM D6703 – 07. El método se basa en la dilución de una muestra líquida de hidrocarburo con una sustancia aromática, y la titulación de esta mezcla con una sustancia parafínica hasta el onset de precipitación. El parámetro de solubilidad de la muestra analizada, deberá estar dentro del intervalo de solubilidad de las sustancias aromática y la parafínica [27].

ALCANCE DEL PRESENTE ESTUDIO

Un área muy importante dentro del negocio de hidrocarburos es la planeación de la producción y procesamiento de crudos. En ella se forjan estrategias para generar dietas óptimas, que garanticen altos rendimientos de productos y mínimo desgaste de equipos.

Actualmente se cuenta con herramientas de optimización, con restricciones de integridad como densidad, acidez, contenido de metales y azufre, pero sin tener en cuenta criterios de estabilidad o compatibilidad de mezclas.

El modelo planteado en este trabajo, servirá como base para generar una herramienta de optimización de dietas, teniendo el parámetro de solubilidad como una restricción, en la búsqueda de preservar y mejorar la eficiencia e integridad de los procesos.

En este contexto el objetivo general del proyecto fue desarrollar un modelo para evaluar estabilidad de mezclas de crudos, basado en la estimación del parámetro de solubilidad mediante la aplicación de una metodología de cálculo por pseudo-componentes.

Los objetivos específicos fueron:

- ✓ Desarrollar un modelo de cálculo para predecir el parámetro de solubilidad de crudos a partir la curva TBP, basado en el corte por pseudocomponentes.
- ✓ Proponer un modelo para evaluar estabilidad de mezclas de crudos a partir de la estimación del parámetro de solubilidad.
- ✓ Validar el modelo propuesto mediante la determinación de los parámetros de estabilidad de 24 crudos y mezclas entre si, por el método experimental IEC.
- ✓ Desarrollar una metodología para generar dietas óptimas de crudos de acuerdo al parámetro de solubilidad.

1. BASES CONCEPTUALES

1.1 Parámetro de Solubilidad de Scatchard - Hildebrand, δ .

El parámetro de solubilidad es una medida de la interacción o energía cohesiva entre las moléculas de una sustancia pura que indica su capacidad de solvencia (Eq. 1).

Está basado en la teoría de disoluciones regulares de Scatchard-Hildebrand, definidas como aquellas en las que los componentes se mezclan sin entropía de exceso, puesto que no hay cambio de volumen durante la mezcla. Dicho de otra manera, una disolución regular es aquella en la que la entropía de exceso se hace cero cuando la mezcla se produce a temperatura y volumen constantes [28].

$$\delta_i = \left(\frac{\Delta U_i^{vap}}{V_i^L} \right)^{1/2} = \left(\frac{\Delta H_i^{vap} - RT}{V_i^L} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Donde V_i^L es el volumen molar en fase líquida, ΔU_i^{vap} y ΔH_i^{vap} son la energía interna molar y el calor de vaporización del componente i , respectivamente. Comúnmente el parámetro de solubilidad se da en $(\text{Cal}/\text{cm}^3)^{0.5}$, $(\text{J}/\text{cm}^3)^{0.5}$ o $(\text{MPa})^{0.5}$

1.1.1 Calor de Vaporización.

Igualmente el calor de vaporización de un componente puro está dado por la siguiente expresión [29].

$$\Delta H_i^{vap} = \Delta H_{nbpi}^{vap} \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_b} \right)^{0.378} \quad (2)$$

Donde

T_b = Temperatura media de ebullición, en grados Rankine.

T_c = Temperatura crítica, en grados Rankine.

T = Temperatura, en grados Rankine.

ΔH_{nbpi}^{vap} = calor de vaporización a T_b .

1.1.2 *Parámetro de Solubilidad para Mezclas de Multicomponentes.*

Para soluciones multicomponentes, el parámetro de solubilidad obedece a la regla de mezcla de la ecuación 3, siendo un promedio ponderado en volumen de los parámetros de solubilidad de las fracciones de todos los componentes de la disolución [29].

$$\delta_{mix} = \sum_j \phi_j \delta_j \quad , \quad \phi_j = \frac{x_j V_j^L}{\sum_k x_k V_k^L} \quad (3)$$

Donde

δ_{mix} =parámetro de solubilidad de la mezcla

ϕ_j =fracción volumétrica por componente

x_j = fracción molar por componente

V_j^L =volumen molar por componente

1.2 **Parámetro de Solubilidad de Floculación, δ_f .**

En el año 2000 Whiehe y Kennedy [8] plantearon, que una dispersión asfalto - resina dada, floclula cuando se encuentra en un medio liquido con un parámetro de solubilidad igual o menor a un valor específico. Esta hipótesis se demostró al ordenar una serie de hidrocarburos puros en incremento de parámetro de solubilidad, y observar que aquellos con un δ menor a cierto valor, precipitan los asfaltos presentes en un producto, y aquellos con un δ de mayor valor los disuelven completamente a una concentración dada (Figura 1).

A partir de esto se propuso un nuevo parámetro denominado parámetro de solubilidad de floculación δ_f , característico de la dispersión resina-asfalto presente en un producto, y que tiene un valor igual al parámetro de solubilidad δ del medio líquido en el cual esta dispersión “justo” comienza a precipitar [16].

Si se considera que los asfaltenos presentes en un crudo, constituyen un grupo molecular con características químicas particulares, se puede afirmar que este crudo tiene un δ_f único y que estos asfaltenos siempre precipitaran cuando se encuentren en un medio líquido que tenga un δ menor o igual al δ_f del crudo.

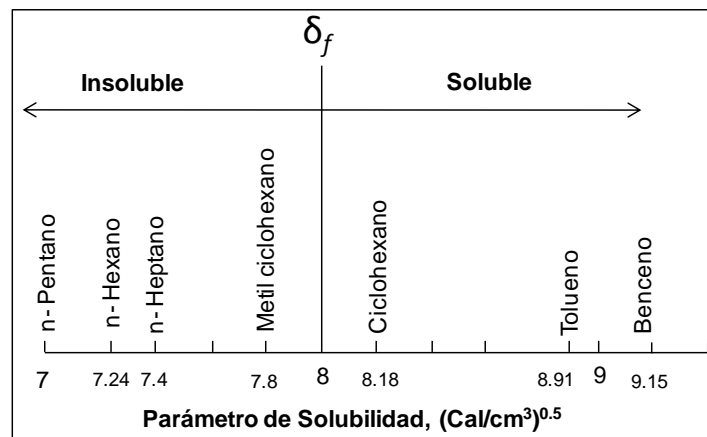


Figura 1 Solubilidad de Solventes y Parámetro de Floculación del Crudo Souedie

Al mezclar separadamente 0,1g de crudo Souedie con 25ml de una serie de solventes (Figura 1), Wiehe observó que los asfaltenos presentes en este crudo se mantenían dispersos con ciclohexano y otros solventes de mayor δ , pero precipitaban cuando se mezclaba con metil-ciclohexano y otros solventes de menor δ . De acuerdo a lo observado, el parámetro de solubilidad de floculación δ_f del crudo, está entre $7,80 [\text{cal}/\text{ml}]^{1/2}$ (metil-ciclo hexano) y $8,19 [\text{cal}/\text{ml}]^{1/2}$ (ciclohexano).

El parámetro de solubilidad de floculación δ_f de un crudo, puede determinarse mezclándolo con un solvente y adicionando un no-solvente de asfaltenos (titulante), en cantidades discretas hasta el “onset de precipitación” (inicio de la precipitación de asfaltenos) [16]. El δ_f será igual al parámetro de solubilidad de la mezcla δ_{mix} , calculado como un promedio volumétrico en el onset (Eq.4).

$$\delta_f = \delta_{mix} = \frac{V_T \delta_T + V_S \delta_S + V_0 \delta_0}{V_T + V_S + V_0} \quad (4)$$

Donde, V_o es el volumen de crudo, V_S el volumen de sustancia solvente, V_T el volumen de sustancia titulante en el “onset” de precipitación y δ_o , δ_f , δ_T son los parámetros de solubilidad del crudo, solvente y titulante respectivamente.

1.3 Modelos de Estabilidad de Crudos Basados en el Parámetro de Solubilidad.

1.3.1 Modelo de Andersen y Pedersen.

Un modelo de estabilidad de mezclas de crudos basado en el parámetro de solubilidad es el de Andersen y Pedersen. Este parte del criterio de titulación de crudos, utilizando tolueno como solvente y n-heptano como agente precipitante [33]. A partir de la relación de volúmenes $V_{precipitante}/V_{oil}$ versus $V_{solvente}/V_{oil}$, y parámetros de solubilidad, Andersen y Pedersen determinan el parámetro de solubilidad crítica δ_{cr} , utilizando la siguiente expresión.

$$\delta_{cr} = \phi_o \delta_o + \phi_H \delta_H + \phi_T \delta_T \quad , \quad \sum \phi_i = 1 \quad (5)$$

Siendo, δ_o , δ_H , δ_T los parámetros de solubilidad del crudo, el heptano y el tolueno respectivamente, y ϕ_o , ϕ_H , ϕ_T las fracciones molares de cada uno de ellos.

Según este modelo, el crudo o la mezcla son estables sí. $\delta_o > \delta_{cr}$

1.3.2 Modelo de Wiehe.

Wiehe parte del criterio de estabilidad de Andersen, y cambia el parámetro crítico por el parámetro de solubilidad de floculación δ_f [16], reescribiendo la ecuación 5 de la siguiente forma:

$$\delta_f = \phi_T \delta_T + \phi_H \delta_H + \phi_o \delta_o \quad , \quad \sum \phi_i = 1 \quad (6)$$

Tanto para Andersen, como para Wiehe, el parámetro de solubilidad crítico o de floculación, se determina disolviendo el hidrocarburo con un solvente (en este caso tolueno), adicionando un no-solvente o agente precipitante (en este caso n-heptano), hasta encontrar el “Onset de Precipitación”

Además Wiehe involucra dos nuevos conceptos, el número de insolubilidad I_N ó PI (Eq. 7), que se define como el poder de solvencia requerido por los asfaltenos de un hidrocarburo para mantenerse disueltos, y el número de solubilidad de mezcla S_{BN} ó PS (Eq. 8), que define como el poder de solvencia de un hidrocarburo para disolver asfaltenos.

Como criterio de estabilidad, el numero de insolubilidad debe ser menor que el numero de solubilidad de mezcla S_{BN} , es decir: $S_{BN} > I_N$ ó $PS > PI$

$$I_N = 100 \left(\frac{\delta_f - \delta_H}{\delta_T - \delta_H} \right) \quad (7)$$

$$S_{BN} = 100 \left(\frac{\delta_{oil} - \delta_H}{\delta_T - \delta_H} \right) \quad (8)$$

Para una combinación de crudos, el número de solubilidad de mezcla S_{BNmix} , debe ser mayor que el máximo número de insolubilidad I_{Nmax} , de cualquiera de los crudos individuales de la mezcla.

El número de solubilidad de mezcla para una combinación de crudos es el promedio volumétrico de cada crudo, calculado de la siguiente manera:

$$S_{BNmix} = \left(\frac{V_1 S_{BN1} + V_2 S_{BN2} + V_3 S_{BN3} + \dots}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots} \right) \quad (9)$$

Por lo tanto el criterio de compatibilidad para mezclas esta dado por la siguiente expresión:

$$S_{BNmix} > I_{Nmax} \quad (10)$$

1.4 Determinación de Parámetros de Estabilidad de Crudos.

Para la estimación de los parámetros de estabilidad existen los métodos manual y automático, y su aplicación está restringida al grado de estabilidad de las mezclas a evaluar.

Para muestras estables los parámetros pueden ser estimados por los dos métodos, mientras que para mezclas inestables, los parámetros solo podrán ser estimados por el método manual [8].

1.4.1 Método Manual de Heithaus.

Este método desarrollado por Heithaus, consiste en determinar el punto en el cual se presenta la floculación de asfaltenos en un crudo previamente disuelto con una sustancia aromática, adicionando una sustancia parafínica que induzca su precipitación.

Una vez se llegue al onset, con el peso de muestra W_{oi} , los volúmenes de sustancia aromática V_{Si} y sustancia parafínica V_{Ti} , se calcula la relación de floculación y la concentración de dilución con las siguientes ecuaciones:

RELACIÓN DE FLOCULACIÓN

CONCENTRACIÓN DE DILUCIÓN

$$FR_i = \frac{V_{Si}}{V_{Si} + V_{Ti}} \quad (11)$$

$$C_i = \frac{W_{oi}}{V_{Si} + V_{Ti}} \quad (12)$$

| PARAMETRO | ECUACIÓN |
|--|-----------------------------------|
| Poder de solvencia requerido por los asfaltenos (PI) | $PI = FR_{max}$ |
| Poder de solvencia disponible de un crudo (PS) | $PS = PI * \frac{1}{C_{min}} + 1$ |
| Reserva de estabilidad de un crudo (P) | $P = \frac{Ps}{1 - Pa}$ |
| Peptizabilidad de los asfaltenos (Pa) | $Pa = 1 - PI$ |

Tabla 1 Parámetros de Estabilidad de Heithaus

Al graficarse C_i vs FR_i se obtiene la línea de estabilidad de la muestra, y se calculan los parámetros de solubilidad PS y PI con las ecuaciones de la Tabla 1, siendo FR_{max} el intercepto con el eje Y y C_{min} el intercepto con el X de la Figura 2,

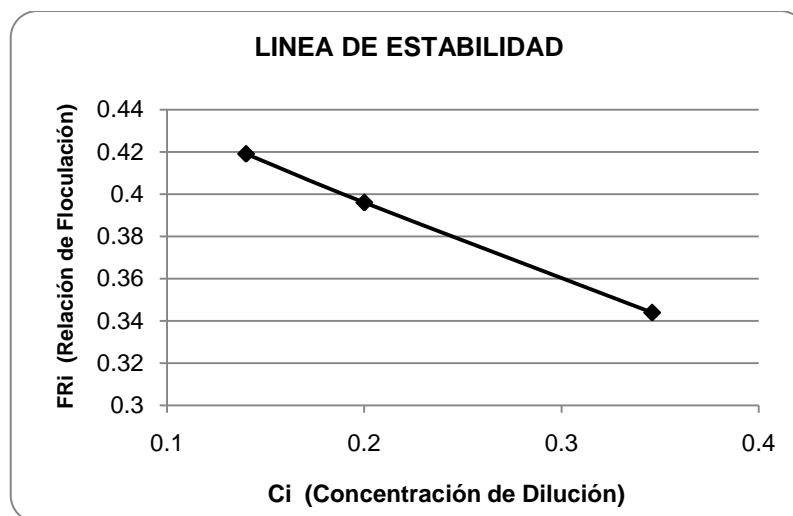


Figura 2 Línea de Estabilidad de Heithaus

1.4.2 Método Automático (*P-Value, Po/FRmax*).

El “onset” de precipitación de productos pesados como fondos de vacío, slurry de ruptura catalítica, breas de viscorreductora y combustóleos, se determina en un analizador automático de estabilidad *Shell/Zematra*.

El analizador consta de dos celdas de reacción de vidrio resistentes a altas temperaturas, con entradas para el sensor óptico (optrode) y el dosificador de titulante (Dosimat). Cada celda está recubierta con una chaqueta térmica que tiene un sistema de control que permite fijar temperaturas hasta 150°C.

La muestra se titula automáticamente con la unidad programada (Dosimat), con volúmenes discretos de cetano (n-hexadecano, grado analítico) y agitación permanente hasta alcanzar la floculación de asfaltenos. Durante el análisis, el sensor óptico (optrode) detecta la reflexión de la luz en la muestra, que es traducida en una señal de voltaje.

En el “onset” de floculación hay una disminución de la reflexión de la luz, debido a que los asfaltenos al precipitar, crean una capa oscura en el fondo de la celda (Figura 3). El software detecta el “onset” como un aumento súbito en la pendiente de la señal de voltaje.

Al iniciar el análisis se pesa en la celda de reacción la cantidad de muestra establecida por el método que se va a utilizar (P-value o Po/FRmax), y se adiciona la cantidad de solvente requerida. La celda de reacción se coloca dentro de la chaqueta de calentamiento previamente ajustada a la temperatura del análisis y se selecciona la velocidad de agitación necesaria para que sea visible un vórtice en la superficie de la muestra. El optrode y el tubo dosificador del Dosimat son colocados dentro de las mangas dispuestas en la cubierta superior de la celda.

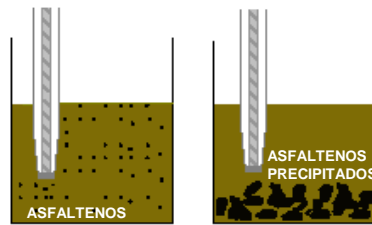


Figura 3 Detección del Onset de Floculación en el Analizador Zematra

1.4.2.1 Método P-Value.

Este método es utilizado para determinar la reserva de estabilidad ($P_{value} > 1$) de los productos que contienen asfaltenos. El parámetro P_{value} se expresa como:

$$P_{value} = 1 + X_{min} \quad (13)$$

Siendo,

$$X_{min} = \frac{\text{cantidad minima de cetano para flocular asfaltenos}(ml)}{\text{cantidad de muestra}(g)} \quad (14)$$

Una muestra de 10 g es titulada con cetano a intervalos de 10 minutos a una temperatura determinada. Durante el análisis se monitorea la mezcla para determinar la presencia de asfaltenos floculados, mientras en la pantalla se registran los parámetros del proceso: voltaje, tiempo, volumen de cetano agregado, pendiente y ruido de la señal de voltaje (mV/min). Al alcanzar el “onset” de floculación, el programa finaliza la titulación y reporta el valor del P-Value correspondiente.

1.4.2.2 Método Po/FRmax

Este método es utilizado para medir el poder de solvencia disponible de los malténos de un hidrocarburo Po, y el poder de solvencia requerido por los asfaltenos del mismo FRmax.

Este método requiere la dilución de cuatro cantidades de la muestra en distintas relaciones con 1-metil naftaleno (Tabla 2), para su posterior titulación con cetano hasta el “onset” floculación.

La secuencia recomendada para la realización del análisis es:

Paso 1: Titulación gruesa de las mezclas A y B

Paso 2: Titulación fina de las mezclas A y B

Paso 3: Titulación fina de las mezclas C y D

| Mezcla | Volumen de 1-MN (ml) | Peso de muestra (g) | Dilución Recíproca (Wo/ V _{1-MN}) |
|--------|----------------------|---------------------|---|
| A | 5.0 | 5.0 | 1.0 |
| B | 3.5 | 7.0 | 2.0 |
| C | 2.5 | 7.5 | 3.0 |
| D | 1.5 | 9.0 | 6.0 |

Tabla 2 Mezclas Estándar para la determinación de Po/FRmax.

El software hace una extrapolación lineal a partir de cada titulación de la grafica $1/X_i$ vs FR_i (Figura 4). El intercepto de la línea con el eje Y es el parámetro FR_{max} , y el intercepto con el eje X es $1/X_{min}$. El parámetro Po es calculado con la siguiente expresión:

$$Po = \left(1 + \frac{1}{x_{min}}\right) * FRmax \quad (15)$$

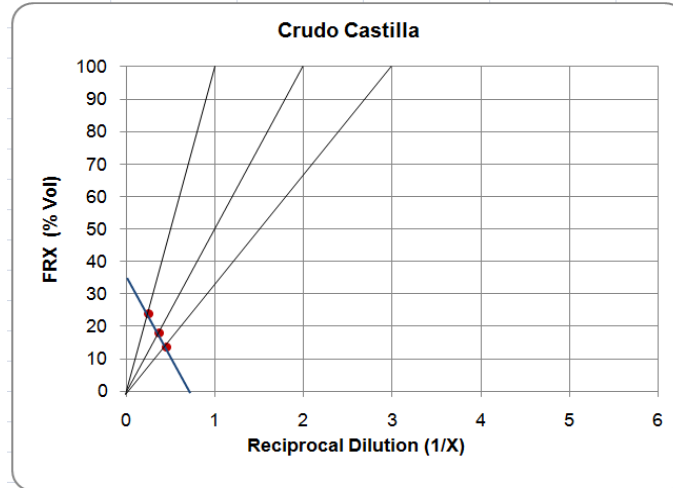


Figura 4 Línea de Estabilidad en el Equipo Zematra.

1.5 Funciones de Distribución de Probabilidad para el Ajuste de Curvas de Destilación de Crudos.

La mayoría de funciones de probabilidad están definidas por un número reducido de parámetros correlacionados en formulas cortas, clasificadas en: funciones de distribución de densidad (PDF) y funciones de distribución acumulada (CDF). Las funciones de distribución de densidad más comúnmente utilizadas son las de tipo campana Gaussiana [6].

De todas las funciones de distribución encontradas en la literatura, 27 fueron seleccionadas para ser analizadas en este estudio y determinar la mejor función para el ajuste de curvas de destilación de crudos. Estas funciones se muestran en la Tabla 3, donde se puede observar el número de parámetros de cada una de ellas.

| Ecuación | Función de Distribución | Parámetros |
|-----------------|--------------------------------|-------------------|
| 1 | Riazi 2 | 2 |
| 2 | Beta 1 | 2 |
| 3 | Gamma 2 | 2 |
| 4 | Gumbel | 2 |
| 5 | Normal 1 | 2 |
| 6 | Normal 2 | 2 |
| 7 | Log-Normal | 2 |
| 8 | Cauchy | 2 |
| 9 | Alfa | 2 |
| 10 | Weibull 2 | 2 |
| 11 | LogisticaGen | 3 |
| 12 | Fisk | 3 |
| 13 | Chi o Si | 3 |
| 14 | ValorExtremoGen | 3 |
| 15 | Frechet | 3 |
| 16 | Nakagami | 3 |
| 17 | T 3 | 3 |
| 18 | Weibull 3 | 3 |
| 19 | Weibull Extreme | 4 |
| 20 | Beta 4 | 4 |
| 21 | Beta 3 | 3 |
| 22 | Riazi 4 | 4 |
| 23 | Burr | 4 |
| 24 | Gamma 4 | 4 |
| 25 | AlfaNormalizado | 4 |
| 26 | Beta 2 | 2 |
| 27 | Kumaraswamy | 4 |

Tabla 3 Funciones de Distribución de Probabilidad Analizadas.

Las funciones de probabilidad fueron inicialmente desarrolladas para predecir una variable en un evento específico. Dependiendo del número de eventos, ellas pueden ser funciones discretas, cuando el número de posibles eventos es discreto, de lo contrario se dice que son funciones continuas [34]. En el presente trabajo solo estudiaremos funciones de distribución continuas.

Debido a su simplicidad, las funciones de distribución de probabilidad son fácilmente incluidas en programas de computación para propósitos de modelamiento, optimización y control de procesos. Sin embargo, no es recomendable seleccionar una función de distribución a la ligera, ya que una buena representación de datos

experimentales con una mínima desviación, depende de las características del evento a estudiar, y del tipo de función de probabilidad seleccionada [34].

Actualmente varias funciones de distribución están siendo utilizadas para cálculos relacionados con la industria del petróleo. Whitson propuso un método para la caracterización de fracciones de petróleo, basado en una función de distribución de tres parámetros γ para la caracterización de C_{7+} . (Whitson 1983)

Dhulesia propuso la función de distribución de Weibull en su forma acumulada, para describir curvas de destilación ASTM de fracciones de petróleo (Dhulesia 1984). Esta función se evaluó con datos experimentales de destilación de cargas y productos de una unidad de cracking catalítico fluidizado FCC, y el ajuste de las curvas de destilación evidenció buena concordancia con los datos experimentales (Kehlen 1987).

La función normal y la función error, fueron utilizadas en el modelamiento de reacciones en procesos de hidro-cracking (Bacaud 1996). Willman y Teja usaron una función de distribución normal-logarítmica bivalente para la caracterización composicional de mezclas involucradas en cálculos de equilibrio de fases (Willman 1986). Igualmente, la función de distribución β está siendo usada para la caracterización de fracciones de petróleo en cálculos que involucran ecuaciones de estado (Peng 1987). La función exponencial y la X^2 , las cuales son casos simplificados de la función γ , están siendo usadas para la caracterización de crudos pesados, y en el desarrollo de herramientas computacionales para el cálculo de equilibrio de fases (Behrens 1998).

Una modificación de la función de Weibull, está siendo usada por Riazi para predecir la distribución de propiedades, tales como, peso molecular, temperatura de ebullición, gravedad específica e índice de refracción en fracciones C_{7+} (Riazi 1989). La función Kumaraswamy tiene características similares a la función β , sin embargo, esta función tiene una forma más simple, tanto para PDF como para CDF (Kumaraswamy 1980). Aunque la función de distribución de Kumaraswamy originalmente fue desarrollada para modelamiento hidráulico, está siendo aplicada para describir variables físicas usadas en ingeniería civil.

1.6 Trazador Cubico para la Representación Continua de la Curva de Destilación de Crudos.

1.6.1 Trazador Cubico Natural.

Dividir un intervalo en un conjunto de subintervalos o fragmentos, se conoce como aproximación polinomial fragmentaria o parte por parte.

La aproximación lineal más simple de esta clase es la interpolación lineal parte por parte, que consiste en unir un conjunto de puntos por una serie de segmentos de recta. Sin embargo, una desventaja de la aproximación de función lineal, es que en cada uno de los puntos extremos de los subintervalos no existe seguridad de diferenciabilidad, lo cual significa que la función de interpolación no es alisada en esos puntos y la función aproximante debe ser continuamente diferenciable [6].

Para obtener la característica de aproximación que se requiere, se utilizan entonces polinomios cúbicos entre cada par de nodos sucesivos, este procedimiento de aproximación se conoce como interpolación adaptadora cúbica. Un polinomio cúbico general implica cuatro constantes, por lo que existe suficiente flexibilidad en el procedimiento de adaptador cúbico para asegurar, no solo que la interpolación es continuamente diferenciable en el intervalo, sino que también tiene su segunda derivada continua en dicho intervalo. La construcción del trazador cúbico, sin embargo, no supone que las derivadas del polinomio de interpolación coincidan con las de la función, ni siquiera en los nodos.

1.6.2 Trazador Cubico Sujeto

El trazador cubico sujeto es aquel polinomio cubico en el cual se toman las condiciones de frontera, y se determina una función interpolante adaptadora cubica en los extremos. Cuando los adaptadores cúbicos de las condiciones de frontera se presentan iguales a cero, es decir libres de fronteras, entonces el adaptador se llama adaptador natural o de cota libre.

En general, las condiciones de frontera fijas o sujetas llevaran a aproximaciones más precisas puesto que incluyen más información acerca de la función. Sin embargo,

para que se cumplan las condiciones de frontera, es necesario contar con los valores de la derivada en los puntos extremos o una aproximación más precisa a esos valores.

1.7 Factor de Caracterización de Watson Kw.

El factor de caracterización es atribuido a la Universal Oil Products y al profesor Watson de la universidad de Wisconsin, y es una medida de la aromaticidad y parafinicidad de un crudo. Dicho factor parte de la base de que la densidad de los hidrocarburos está ligada a la relación H/C [29], por tanto a su carácter químico, y que su punto de ebullición está relacionado con el número de átomos de carbono (eq-16)

$$K_w = \frac{\sqrt[3]{NBP}}{SG} \quad (16)$$

Siendo, NBP temperatura media de ebullición en Kelvin, y SG gravedad específica.

El factor es relativamente constante a través de todo el rango de ebullición del crudo, y tiene una relación directa con el parámetro de solubilidad. En la Figura 5 se da como ejemplo la solubilidad del C_8 en función de su caracterización.

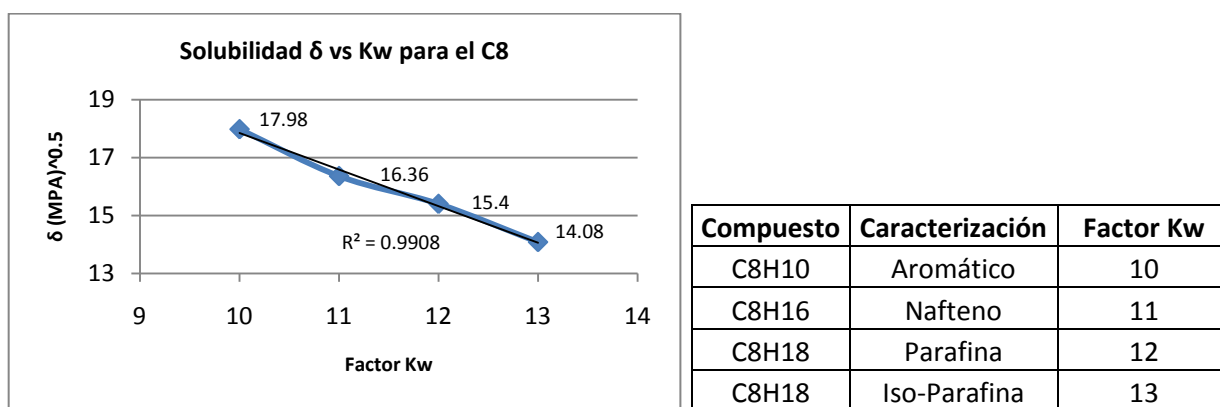


Figura 5 Parámetro de Solubilidad del c8+ en Función del factor Kw

2. METODOLOGÍA.

2.1 Determinación de Curvas de Destilación TBP de Crudos.

Una muestra previamente pesada del crudo se destiló hasta una temperatura máxima de 400°C AET (Temperatura Atmosférica Equivalente), en una columna de fraccionamiento de 14 a 18 platos teóricos que tiene una eficiencia de reflujo total. Las destilaciones atmosféricas se realizaron con 12 litros de cada mezcla en la unidad de destilación Fischer Destilat.

Los rendimientos en masa de la destilación se calcularon a partir de la masa de todas las fracciones, incluidos el corte de gas licuado y el residuo. Los rendimientos en volumen se estimaron a partir de la masa y la densidad de cada fracción. Con estos datos se determinó la curva TBP en porcentaje de masa o volumen vs temperatura atmosférica equivalente (AET) de destilación.

Los fondos de vacío de los crudos analizados se obtuvieron en la unidad de destilación de alto vacío de 10 litros según la norma ASTM 5236, en donde se alcanza un vacío de 0.1 mm de Hg. Aunque se definió 550°C como punto final para terminar la destilación al vacío, algunos crudos pesados no alcanzaron este punto de ebullición y se detuvo antes el proceso de destilación. Figura 6

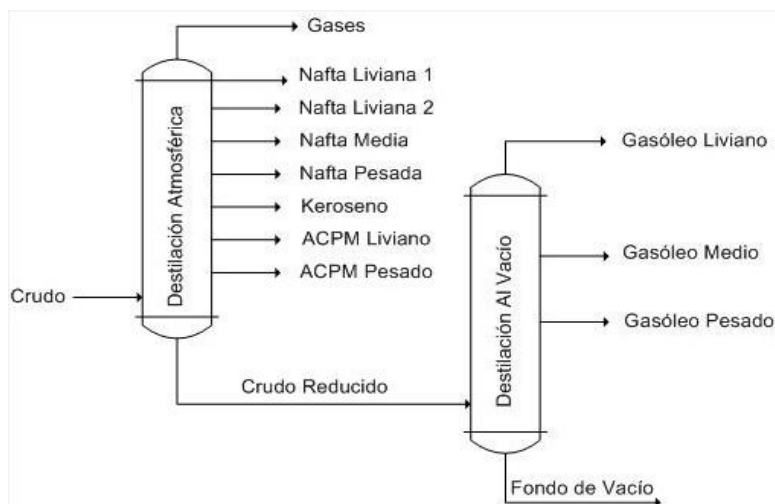


Figura 6 Esquema de Destilación de Crudos

2.2 Caracterización Físico-Química de Las Fracciones.

Se midieron algunas propiedades a los crudos y a las fracciones obtenidas en la destilación, con el propósito de evaluar posibles variaciones dadas por la condición de estabilidad o inestabilidad de las mezclas.

Las normas utilizadas para determinar las propiedades físico-químicas de las fracciones se presentan en la Tabla 4

| PROPIEDAD | MÉTODO |
|---|--|
| Densidad y Gravedad API | ASTM D-5002 |
| Viscosidad Dinámica y Cinemática | ICP- PTE.27.006 y ASTM D 445 |
| Factor de Caracterización <i>K</i> | CALCULADO |
| Fracciones SARA: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos | ASTM D 4124-91 y ASTM D 2007-93 |
| Fracciones PIANO: Parafinas, Iso-parafinas, Aromáticos, Naftenos y Olefinas | ASTM D 6729 |
| Contenido de Insolubles en n-C7 y n-C5 | UOP 614 y ASTM D 4055 |
| Contenido de Ceras | UOP 46-85 |
| Contenido de Azufre, Nitrógeno y Metales | ASTM D 4294, ASTM 3228-96, ASTM D 5863 y ASTM 5184 |
| Residuo de Carbón Conradson | ASTM D 4294 |
| Número de Ácido Total | ASTM D 664 |

Tabla 4 Propiedades Físico-Químicas y Métodos de Caracterización.

2.3 Determinación de Parámetros de Solubilidad de Crudos y Mezclas.

Los métodos utilizados para determinar los parámetros de estabilidad, se establecieron después de clasificar los crudos y mezclas a evaluar. 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, ya que por el automático solo se pueden evaluar muestras estables. La metodología utilizada se muestra en la Figura 7.

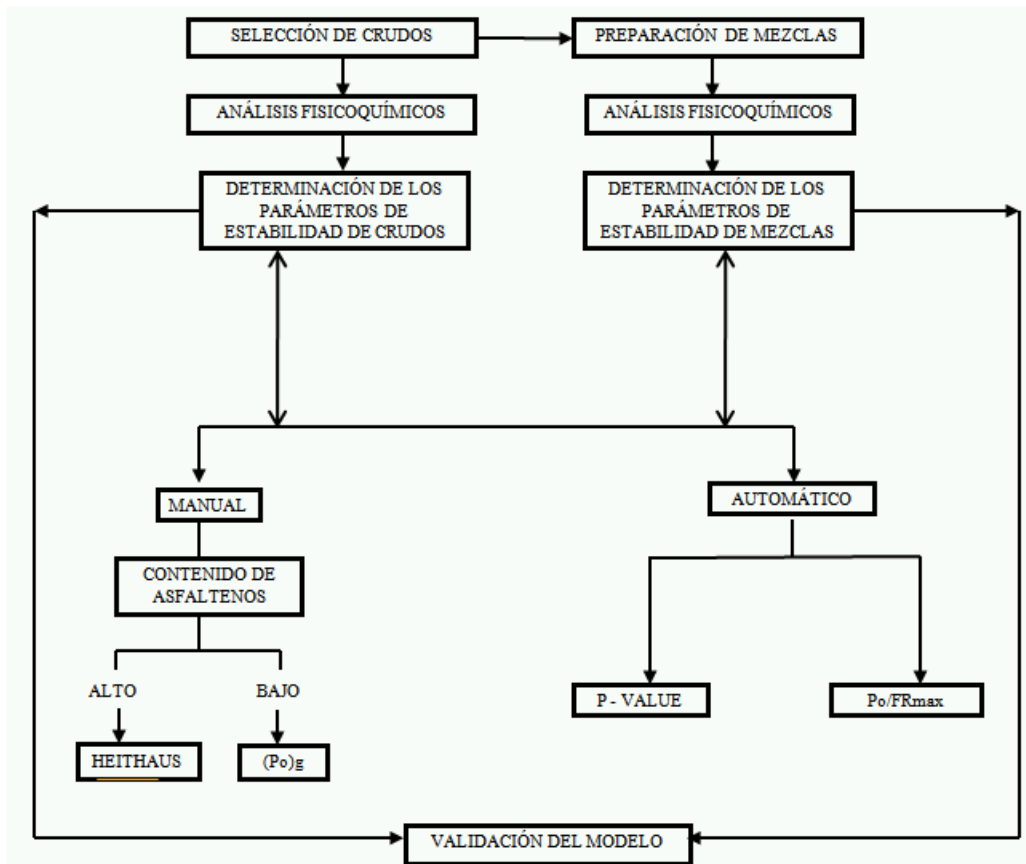


Figura 7 Metodología Experimental para Determinación de Parámetros de Solubilidad

2.3.1 Método Manual IEC.

El método experimental usado para determinar los parámetros de estabilidad, es una modificación de la metodología Heithaus, a la que denominamos método IEC.

Básicamente la diferencia radica en que, el método Heithaus utiliza tolueno (aromático) como disolvente, y n-heptano como titulante (parafínico), mientras el método IEC utiliza otros compuestos.

A tres muestras de 2 ± 0.1 g previamente pesadas y contenidas en tres frascos ámbar, se les adicionó 2, 4 y 6 ml de sustancia aromática respectivamente, y se agitaron por 10 min. Posteriormente utilizando la cromatografía en papel, se observó si había presencia de ceras, determinando así, la necesidad o no de calentar las muestras.

A cada uno de los frascos se adicionó secuencialmente volúmenes de 1 ml de la sustancia parafínica hasta el onset. La titulación se repitió con incrementos de 0,1 ml de titulante. Una vez determinado el onset, con el peso de la muestra W , los volúmenes de sustancia aromática disolvente V_S y sustancia parafínica titulante V_T , se calcularon los parámetros de solubilidad PS y PI, a partir de las ecuaciones de la Tabla 1.

2.3.2 Método Automático P-Value.

Para la determinación de los parámetros de estabilidad por el método P-Value, una muestra de crudo de 10 g se tituló con cetano a intervalos de 10 minutos a una temperatura determinada.

Durante el análisis, se hizo seguimiento a la mezcla para determinar la presencia de asfaltenos floculados, mientras se monitoreaban en la pantalla los parámetros de proceso: voltaje, tiempo, volumen de cetano agregado, pendiente y ruido de la señal de voltaje (mV/min). Al alcanzar el “onset” de floculación, el programa reportó el valor de P-Value correspondiente. La descripción detallada del método se da en la sección 1.4.3.1

2.3.3 Método Po/FRmax.

Para determinar los parámetros de estabilidad por el método Po/FRmax, se titularon cuatro muestras de crudo disuelto en distintas relaciones con 1-metil naftaleno (las relaciones recomendadas por la norma se dan en la sección 1.4.3.2), para su posterior titulación con cetano hasta el “onset” floculación.

2.4 Desarrollo del Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos.

El modelo para la estimación del parámetro de solubilidad de crudos, está basado en el cálculo de pseudocomponentes a partir de la curva de destilación TBP. La metodología para su desarrollo fue la siguiente:

2.4.1 Evaluación de Funciones de Distribución de Probabilidad para Ajuste de la Curva de Destilación TBP.

Con el fin de encontrar la función de distribución de probabilidad más adecuada para extrapolar las curvas TBP's, en los casos en que el rango de destilación no abarque el 100%, se evaluaron 27 funciones de probabilidad utilizadas en el área de hidrocarburos de acuerdo a un análisis del estado del arte.

El estudio se dividió en dos partes secuenciales: una primera en donde se determinó la clasificación de las mejores funciones para la representación continua de las curvas (curvas completas), y una segunda parte donde se estimaron las mejores funciones para extrapolar (curvas incompletas).

2.4.1.1 Representación Continua de la curva TBP.

La comparación de las 27 funciones de probabilidad reportadas en la Tabla 3 para el ajuste de curvas de destilación, se realizó por métodos estadísticos, para una muestra de 24 crudos. El procedimiento utilizado para la estimación de parámetros se describe a continuación:

Paso 1. La temperatura fue llevada a una forma adimensional usando la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \frac{T_i - T_0}{T_l - T_0} \quad (17)$$

Donde θ_i es la temperatura adimensional, T_i es la temperatura media de ebullición actual, y T_0 y T_l son temperaturas de referencia, que para este estudio se tomaron -35.6°C y 1021.4°C , que corresponden a los valores mínimo y máximo de la matriz de temperaturas de los 24 crudos evaluados.

Paso 2. Un método de optimización (Marquardt 1963) fue aplicado para obtener los parámetros óptimos de las funciones de distribución de probabilidad. El criterio de optimización utilizado fue la minimización de la suma residual de cuadrados definidos por la ecuación 18.

$$RSS = \sum (y_{exp,i} - y_{cal,i})^2 \quad (18)$$

Donde $y_{exp,i}$ y $y_{cal,i}$ son las fracciones en peso experimentales y calculados, respectivamente.

Paso 3. Predicción de rendimientos usando las funciones de distribución con los parámetros óptimos calculados anteriormente.

2.4.1.2 Estudio de la Capacidad Predictiva de las funciones de Probabilidad.

La capacidad predictiva de las diferentes funciones, fue evaluada de acuerdo al coeficiente de correlación R^2 y algunos indicadores estadísticos. Inicialmente, la comparación de las funciones de probabilidad se basó en los indicadores Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC).

El AIC es un indicador operacional que considera tanto la complejidad de un modelo como el buen ajuste de los datos (Burnham 1998). La metodología AIC busca encontrar el mejor modelo para el ajuste de datos con un mínimo número de parámetros. Cuando los residuales son distribuidos aleatoriamente, el AIC es calculado con la expresión 19

$$AIC = 2k + n \ln \left(\frac{RSS}{n} \right) \quad (19)$$

Donde k es el número de parámetros, n es el número de observaciones, y RSS es la suma residual de cuadrados. AIC incluye un término $2k$ que es una función incremental del número de parámetros; esta característica es muy útil para la comparación de modelos con diferente número de parámetros. En este estudio las funciones de probabilidad con más bajo valor del AIC, serán las mejores para ajuste de curvas de destilación de crudos.

El criterio de información Bayesiano para modelos con residuales distribuidos aleatoriamente, es calculado con la expresión 20.

$$BIC = k \ln(n) + n \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) \quad (20)$$

Al comparar el AIC y el BIC, este último penaliza más fuertemente el número de parámetros. Como sucede con el AIC, los modelos con los valores más bajos de BIC son los más preferidos.

2.4.1.3 Análisis de Funciones de Probabilidad para Extrapolación de la Curva TBP.

Una vez hecho el análisis de las mejores funciones de probabilidad para la representación continua de las curvas TBP de crudos, se evaluaron las funciones más eficientes para la extrapolación de curvas de destilación incompletas.

Para este estudio nos basamos en dos criterios de comparación en función de la variabilidad: R^2 solo de los datos extrapolados de la zona incompleta de la curva, y R^2 respecto al total de datos de la curva de destilación.

2.4.2 Generación de Pseudocomponentes a partir de la Curva TPB del Crudo.

Una vez estimadas las curvas de destilación hasta el 100% de volumen recobrado, se evaluó la eficiencia, tanto de la función de probabilidad usada para la extrapolación, como la del trazador cubico en la generación de pseudocomponentes. El cálculo de pseudocomponentes se basa en la representación continua de la curva TBP, e integración por intervalos de temperatura para estimar propiedades de cada

uno de los cortes. Al ser el trazador cubico una técnica de interpolación que genera polinomios de tercer grado para cada intervalo, se determinó que este era el más eficiente y de fácil integración.

2.4.2.1 Estimación de Propiedades de Pseudocomponentes.

Para generar los cortes a lo largo de la curva de destilación, se tomaron los puntos inicial y final de cada curva, y se dividió en 40 intervalos iguales de temperatura como lo expresa la ecuación 21.

$$\Delta T = \frac{T_f - T_i}{n} \quad (21)$$

Siendo T_f y T_i temperatura final e inicial de la curva TBP, y n el numero de intervalos o pseudocomponentes a generar, que para este estudio estuvo entre 34 y 49, de acuerdo al rango de temperatura de las curvas de destilación de cada crudo. En la Figura 8 se muestra como son generados los pseudocomponentes a lo largo de la curva de destilación.

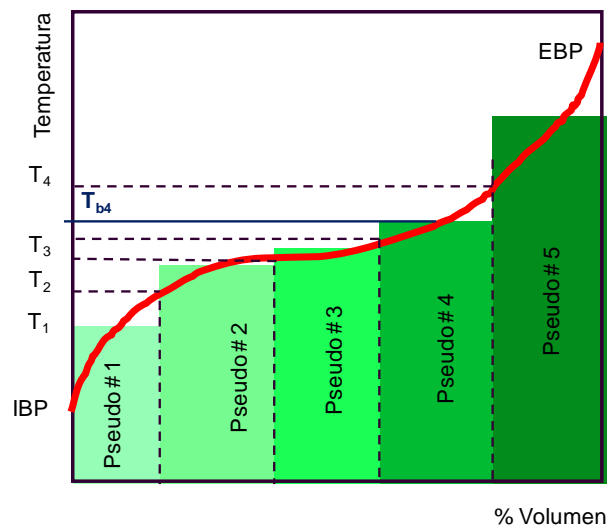


Figura 8 Representación Grafica de Pseudocomponentes.

Una vez generados los cortes, se calculo el punto medio de ebullición, gravedad específica y peso molecular para cada pseudocomponente.

A partir de la representación continua de la curva de destilación, se calculó la integral en cada intervalo para estimar la T_{bi} para cada pseudocomponente, como lo indica la ecuación 22.

$$T_{bi} = \frac{\int_{v_{min}}^{v_{max}} T(v)dv}{v_{max}-v_{min}} \quad (22)$$

Siendo T_{bi} la temperatura media de ebullición por pseudocomponente, $T(v)$ la función de representación continua de la curva de destilación, y v_{max} y v_{min} los valores de volumen de cada corte dentro de la curva.

Asumiendo que el factor K_w del crudo es aproximadamente igual al de cada pseudocomponente, a partir de la gravedad específica y temperatura media de ebullición del crudo, se determinó la gravedad específica para cada corte, con las ecuaciones 23 y 24.

$$K_w = \frac{T_{b_{crudo}}^{1/3}}{SG_{crudo}} \quad (23) \quad SG_i = \frac{T_{bi}^{1/3}}{K_w} \quad (24)$$

Donde, $T_{b_{crudo}}$, T_{bi} , SG_{crudo} y SG_i son las temperaturas medias de ebullición y las gravedades específicas del crudo y de cada pseudocomponente, respectivamente.

Una vez calculadas las propiedades T_{bi} y SG_i , mediante el uso de correlaciones se estimaron las propiedades críticas, calor de vaporización, y demás propiedades necesarias para el cálculo del parámetro de solubilidad de Hildebrand, δ . Ver correlaciones anexo 1.

Al haber asumido el factor K_w del crudo igual que el de los pseudocomponentes, es necesario corregir el parámetro de solubilidad δ en función de este factor K_w . Puesto que existe una relación directa entre estas dos variables, se generó una correlación para el ajuste del parámetro de solubilidad de crudos.

Con el fin de robustecer el modelo, igualmente se evaluó la influencia de otras variables independientes como, composición de asfaltenos, aromáticos, resinas etc. Para obtener la mejor correlación, se realizó un riguroso análisis de regresión utilizando una metodología que incluye: regresión por pasos, selección directa, regresión completa, y eliminación hacia atrás. En la Tabla 5 se hace un resumen de la metodología.

| ID | Método | Explicación |
|----|-------------------------|---|
| 1 | Regresión por pasos | Algoritmo en el que agrega o elimina variables al modelo usando la prueba parcial F. En este algoritmo una variable que ya ingreso al modelo puede salir más adelante por el efecto de otras. |
| 2 | Selección directa | Se agregan variables al modelo usando la prueba parcial F. Una variable que ya ingreso al modelo no sale en una etapa posterior. |
| 3 | Regresión completa | Construye un modelo con todas las posibles variables independientes. |
| 4 | Eliminación hacia atrás | Parte de un modelo con todas las variables y va eliminado una variable a la vez usando la prueba parcial F. |

Tabla 5 Metodología de Análisis de Regresión para Ajuste de δ

Al final del análisis de regresión se determino que el parámetro de solubilidad δ solo está directamente relacionado con el factor Kw . Para esta relación se obtuvieron una serie de correlaciones, algunas muy complejas, por lo que optamos por utilizar la función lineal de dos parámetro (25), con un R^2 ajustado de 0.9338.

$$\delta_{\text{Corregido}} = -63.4504 + 3.40125 * \delta_{\text{Calculado}} + 2.08904 * Kw \quad (25)$$

Siendo, $\delta_{\text{Calculado}}$ y Kw , parámetro de solubilidad en MPA y factor de caracterización, calculados con el modelo por el método de pseudocomponentes.

Mediante la ecuación 26 se calculo la solubilidad requerida PS, a partir de los parámetros de solubilidad del disolvente y titulante, empleados en la metodología experimental evaluada, IEC.

$$PS = \left(\frac{\delta_{\text{corregido}} - \delta_{\text{solvente}}}{\delta_{\text{titulante}} - \delta_{\text{solvente}}} \right) \quad (26)$$

2.5 Modelo para Predecir la Estabilidad de Mezclas a Partir del Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos.

Partiendo del criterio de estabilidad $PS_{mix} > PI_{max}$ (solubilidad disponible de la mezcla mayor que la solubilidad requerida), se propone un modelo que permitirá predecir la estabilidad de mezclas, basado en la estimación del parámetro PS con el modelo de cálculo por pseudocomponentes.

La metodología propuesta se presenta en la Figura 9

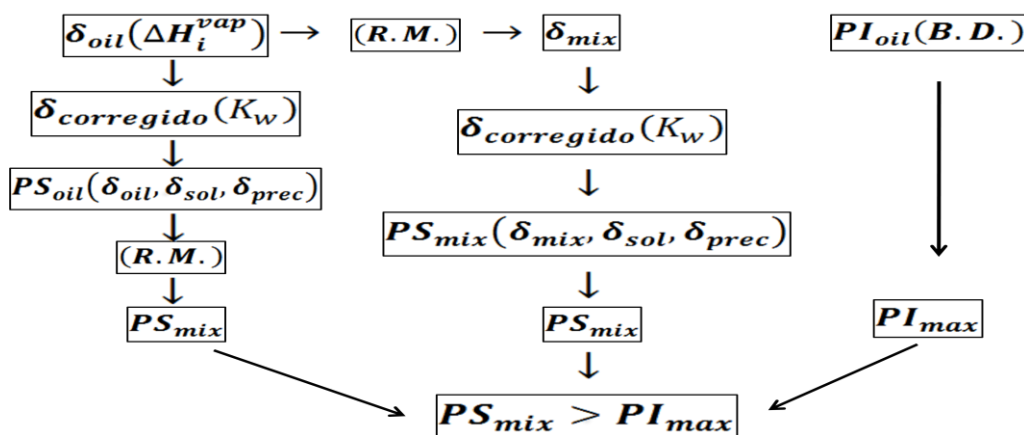


Figura 9 Modelo para Predecir Estabilidad de Mezclas a Partir del Parámetro de Solubilidad.

Siendo, δ_{oil} solubilidad del crudo calculado por pseudocomponentes, $\delta_{corregido}$ solubilidad corregida con el factor Kw, PS_{oil} solubilidad disponible del crudo calculada en función de la solubilidad del solvente y el titulante, $R.M.$ regla de mezcla, PS_{mix} solubilidad disponible de la mezcla, $PI_{oil}(B.D)$ solubilidad requerida del crudo, PI_{max} máxima solubilidad requerida de los crudos individuales de la mezcla.

2.5 Validación del Modelo Propuesto a Partir de Datos Experimentales.

Tomando como patrón de referencia los parámetros de solubilidad determinados por el método IEC, se validó el modelo con una muestra de 24 crudos. Para este propósito se determinó la repetibilidad del método experimental, haciendo tres repeticiones para tres crudos diferentes.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos.

3.1.1 Evaluación de Funciones de Distribución de Probabilidad para Ajuste de la Curva de Destilación TBP.

El estudio se dividió en dos partes secuenciales: una primera donde se determinó la clasificación de las mejores funciones para la representación continua de las curvas (curvas completas), y una segunda parte donde se estimaron las mejores funciones para extrapolar (curvas incompletas).

3.1.1.1 Estudio de la Capacidad Predictiva de las funciones de Probabilidad.

Como resultado del análisis de las 27 funciones de probabilidad, se generó una clasificación de acuerdo a algunos criterios matemáticos. La evaluación se hizo por métodos estadísticos para una muestra de 24 crudos.

A manera de ilustración, a continuación se muestra la eficiencia de tres funciones de probabilidad, comparando la curva de destilación calculada con la curva de destilación original del crudo M.

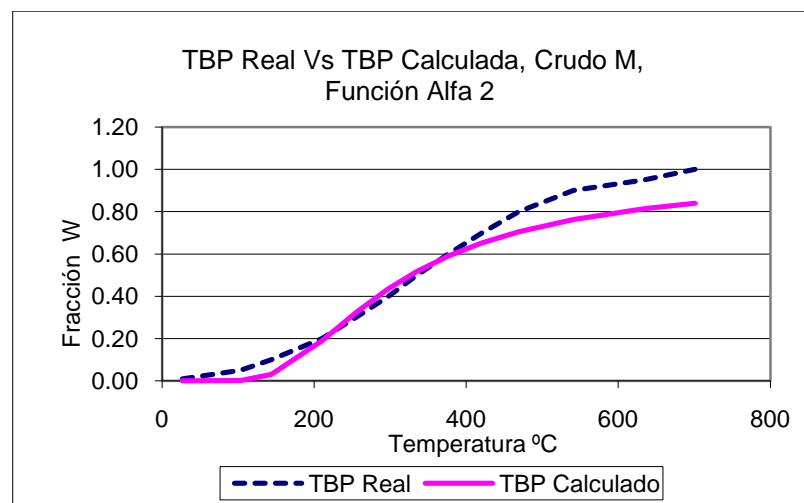


Figura 10 TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Alfa 2

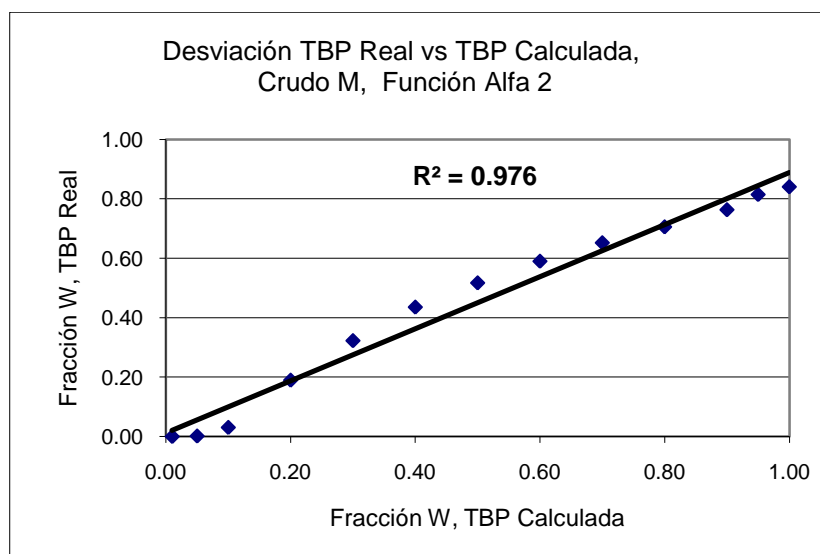


Figura 11 Desviación TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Alfa 2

En las figuras 10, 12 y 14 se observa que las mejores funciones para el ajuste de la curva de destilación del crudo M, son en su orden la función Weibull Extreme 4, Gambel 2 y Alfa 2.

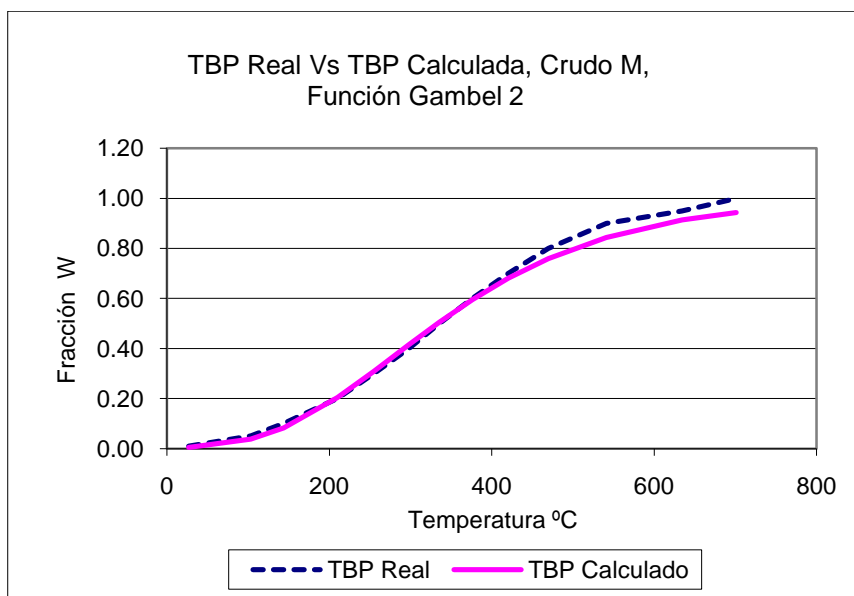


Figura 12 TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Gambel 2

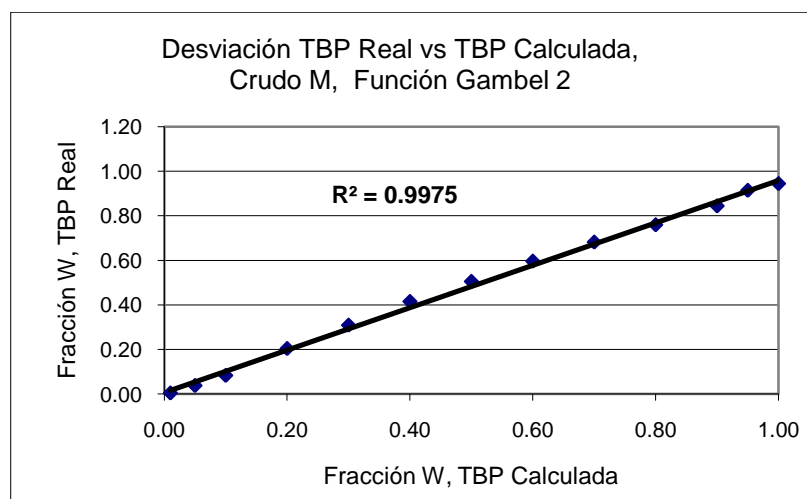


Figura 13 Desviación TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Gambel 2

Coeficientes de correlación R^2 , fueron obtenidos por análisis estadístico a partir de esquemas de paridad de valores experimentales versus calculados.

Aunque el error o desviación de los datos calculados con respecto a los datos reales es muy pequeño, se observa un mejor comportamiento para la función Weibull 4, evaluando inicialmente el R^2

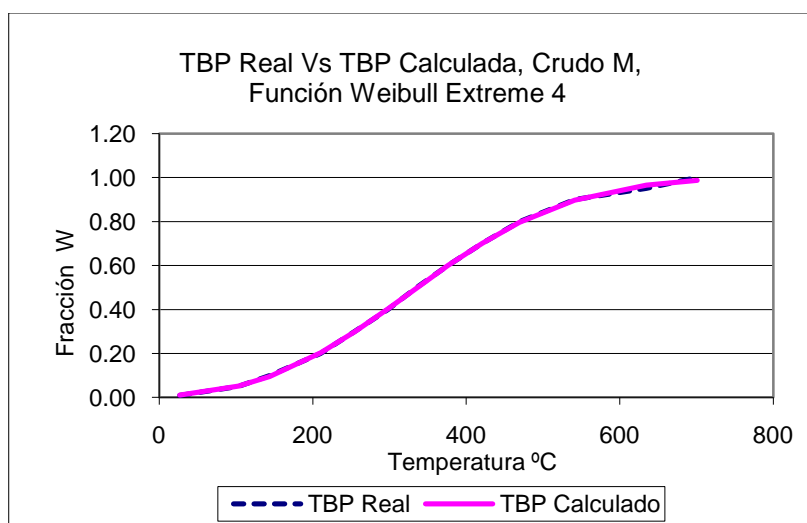


Figura 14 TBP Real Vs TBP Calculada, Crudo M, Función Weibull Extreme 4

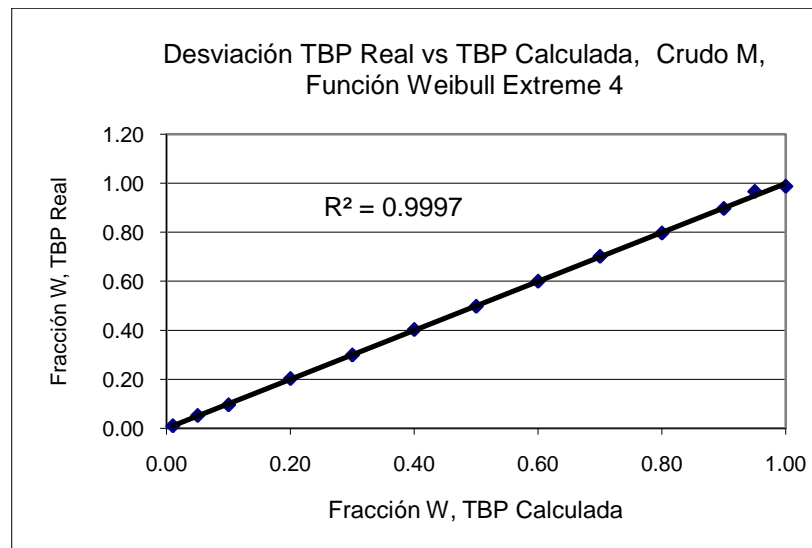


Figura 15 TBP Real vs TBP Calculada, Crudo M, Función Weibull Extreme 4

Con el fin de encontrar la mejor función de probabilidad para la representación continua de la curva TBP en crudos, este mismo análisis se realizó a la totalidad de los crudos, evaluando cada uno de ellos con las 27 funciones de distribución de probabilidad seleccionadas para este estudio. Tabla 3

La capacidad predictiva de las diferentes funciones fue evaluada de acuerdo al coeficiente de correlación R^2 y a los indicadores estadísticos Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC). (Ver definición en sección 2.4.1.2).

En la Figura 16 se muestra la clasificación de las 27 funciones de probabilidad evaluadas con los 24 crudos seleccionados para el ajuste de curvas TBP, teniendo como criterio de comparación el coeficiente de variabilidad R^2 . Este fue evaluado comparando datos calculados con experimentales de las curvas de destilación de cada crudo.

Se puede observar que para este criterio de comparación, el número de parámetros juega un papel importante siendo las 10 primeras en su mayoría, las que cuentan con un número mayor.

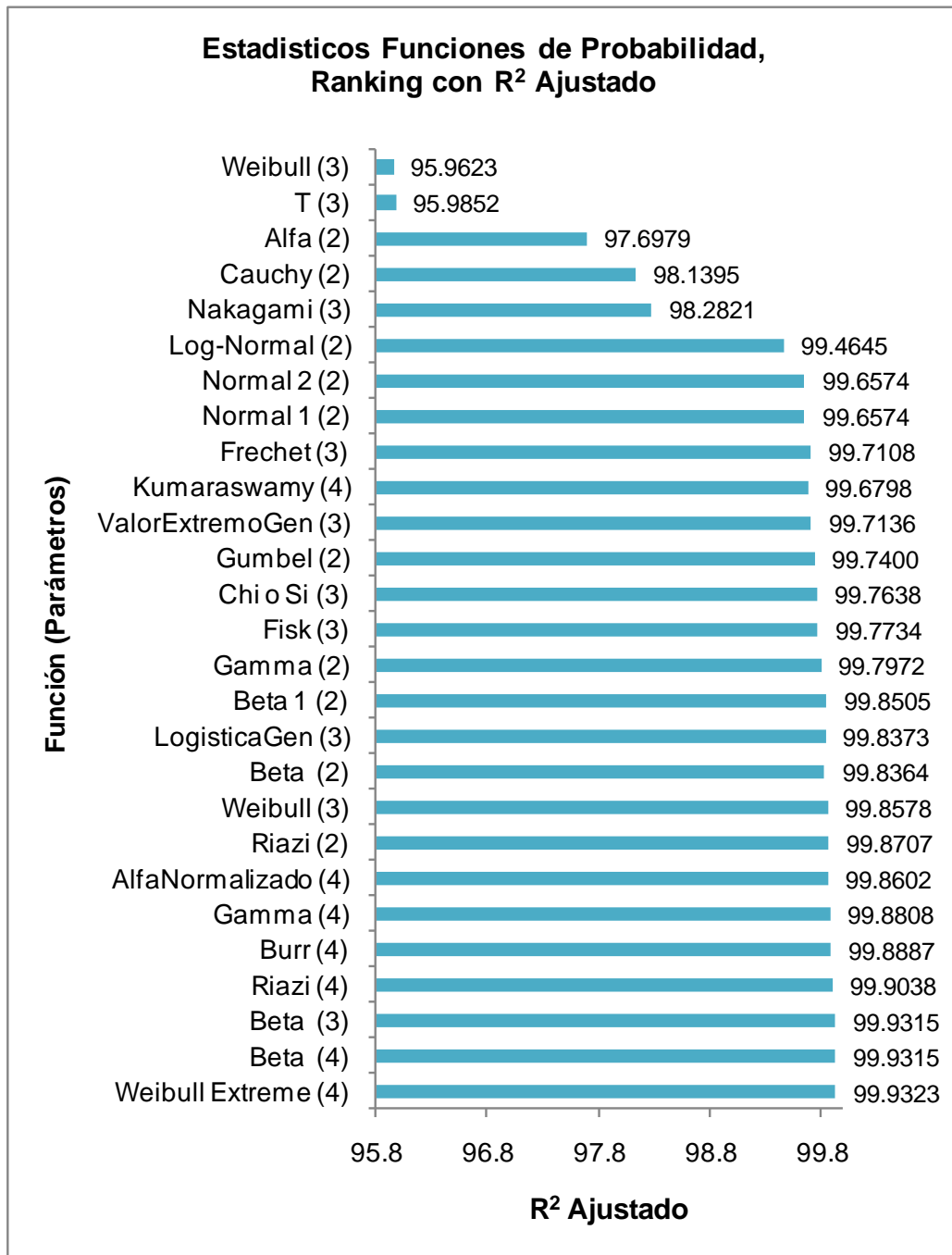


Figura 16 Funciones de Probabilidad para Ajuste de TBP, Ranking con R².

En el primer lugar está la función Weibull Extreme 4, en el decimo lugar la función Beta 4, y en el último lugar la función Weibull de tres parámetros. Si bien la deferencia entre las Weibull Extreme 4 y la Beta 2 no es muy marcada, si lo es con la Weibull de 3 parámetros que ocupó el último lugar con un R² de 95.95.

Tomando la variabilidad R^2 como criterio de comparación, podemos concluir que las funciones Weibull, Beta y Riazi, en su orden, son las mejores para hacer una representación continua de la curvas de destilación de crudos.

Con base a los indicadores estadísticos AIC y BIC mencionados anteriormente, en las figuras 17 y 18 se muestra la clasificación conforme a estos dos criterios de comparación.

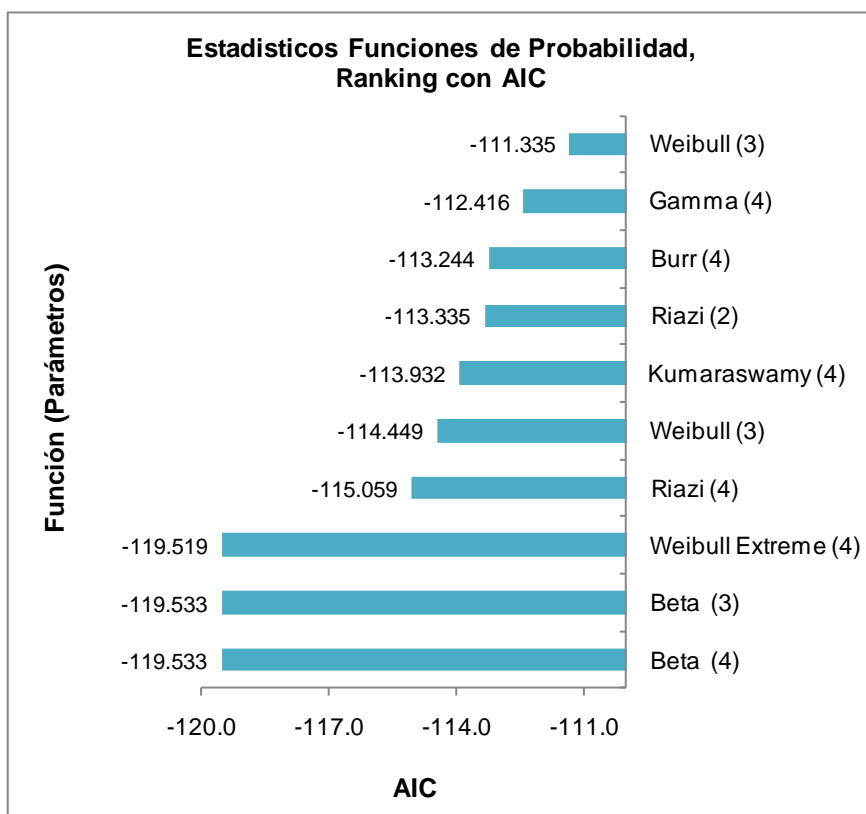


Figura 17 Funciones de Probabilidad para Ajuste de TBP, Ranking con AIC.

En la Figura 17 se muestran las 10 primeras funciones de probabilidad dentro del ranking de clasificación por AIC. Para este caso el criterio de comparación es el menor valor de este indicador.

De acuerdo a esto, la función Beta 4 es la más eficiente, seguida de la Weibull Extreme 4 y la función Riazi de cuatro parámetros. Además, dentro de esta nueva clasificación encontramos otra de las funciones Weibull evaluadas en este estudio, así como la función Kamaraswamy 4.

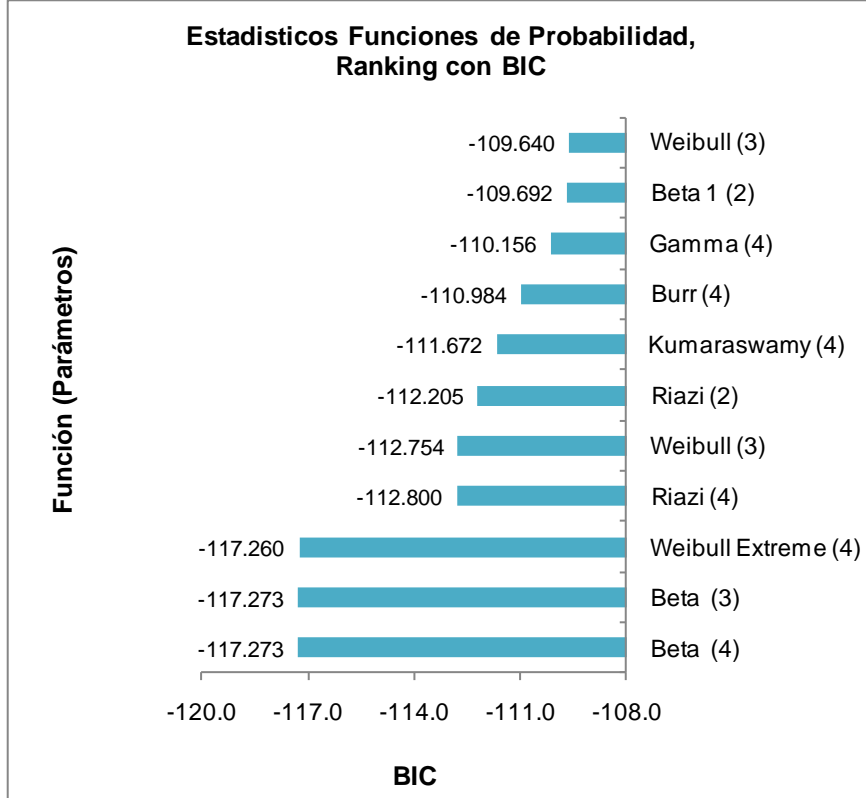


Figura 18 Funciones de Probabilidad para Ajuste de TBP, Ranking con BIC.

En la Figura 18 se muestran las 10 primeras funciones de probabilidad dentro del Ranking de clasificación por BIC. Igualmente, para este caso el criterio de comparación es el menor valor de este indicador.

Para la clasificación por BIC se mantienen las mismas funciones de probabilidad, cambiando el orden de prioridad entre las funciones Riazzi y Kamaraswamy. Esto se debe a que el indicador BIC prioriza las funciones con menor número de parámetros para funciones con características similares.

Si bien las funciones con cuatro parámetros son las más eficientes para ajustar curvas de destilación de crudos, según este estudio, podríamos considerar también las funciones con menor número de parámetros que se encuentren dentro de la clasificación de las 10 mejores, esto debido a que para efectos de cálculo y programación, es aconsejable el uso de funciones con el menor número de

parámetros posible. De acuerdo a este criterio las mejores funciones serian en su orden, la Weibull 3, Riazi 2 y Beta de dos parámetros.

3.1.1.2 Análisis de Funciones de Probabilidad para Extrapolación de la Curva TBP.

El análisis está basado en el coeficiente de variabilidad R^2 considerando: solo el R^2 de los datos extrapolados en la zona incompleta de la curva, y R^2 respecto al total datos de la curva de destilación.

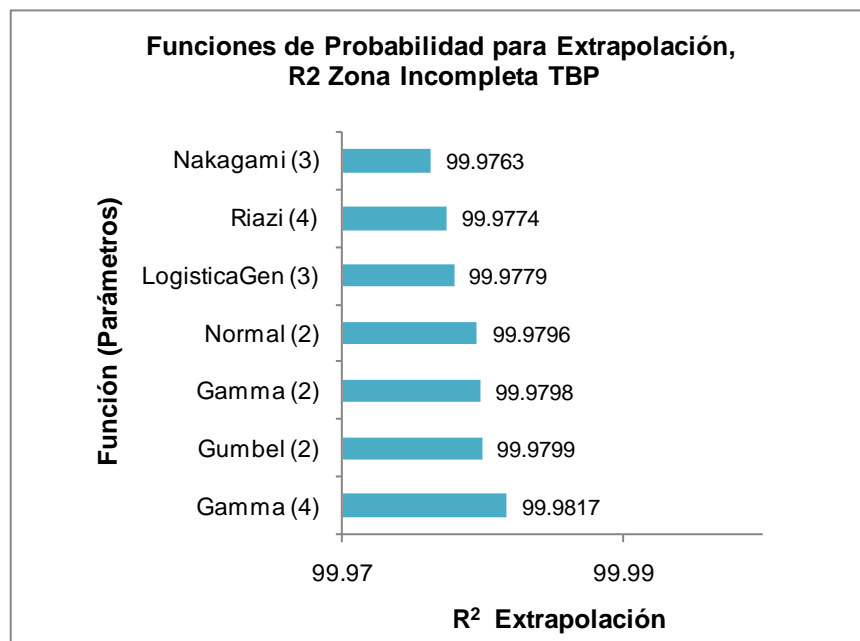


Figura 19 Funciones de Probabilidad para Extrapolación de TBP, R^2 Zona Incompleta.

Como se observa en la Figura 19, si evaluamos la desviación solo con los datos extrapolados, las funciones más eficientes para extrapolación son en su orden: la Gamma 4, Gumbel 2, y la normal de dos parámetros. De la clasificación realizada en la sección anterior como las 10 mejores para el ajuste de curvas, solo las funciones Riazi y Gamma de cuatro parámetros aparecen en este nuevo Ranking para extrapolación.

Si incluimos la totalidad de los puntos para el cálculo de la desviación, las funciones que mostraron mejor comportamiento fueron en su orden: la Riazi, la Weibull

Extreme y Gamma, todas con cuatro parámetros Figura 20. Para esta clasificación, la mayor parte de las funciones están dentro de las 10 mejores para el ajuste de curvas de destilación.

De acuerdo al análisis de las 27 funciones de distribución de probabilidad, evaluadas con 24 crudos, podemos concluir que tanto para ajustar a una representación continua, como para extrapolar curvas de destilación de crudos, las funciones más eficientes son en su orden, la Weibull Extreme 4 y la Riazzi de cuatro parámetros.

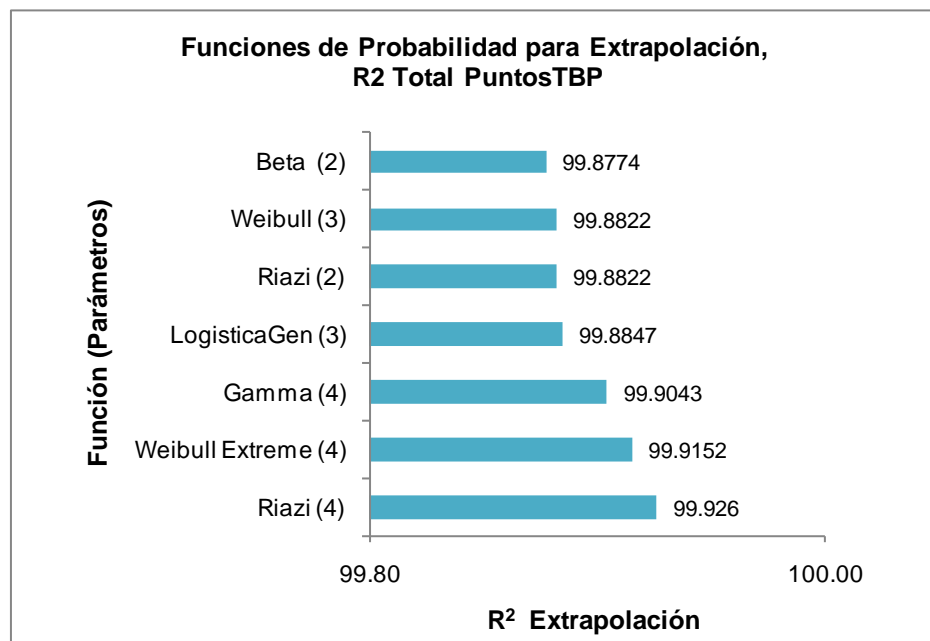


Figura 20 Funciones de Probabilidad para Extrapolación de TBP, R² Total Puntos TBP.

3.1.2 Propiedades y Parámetro de Solubilidad de Pseudocomponentes.

Calculadas las propiedades T_{b_i} y SG_i usando la secuencia expuesta en la metodología, mediante correlaciones se estimaron las propiedades críticas, calores de vaporización, y demás propiedades necesarias para el cálculo del parámetro de solubilidad, δ . Ver correlaciones anexo 1.

Como ilustración en la Tabla 6 se muestran los datos de salida del modelo, para el cálculo por pseudocomponentes de propiedades y solubilidad del crudo M, uno de los crudos evaluados.

| Pseudo | Tbi °C | Gravedad SG | VolMolar Vi (ft3/mol) | Fracción Molar Xi | Factor Kw | Volumen, i Xi*Vi (ft3) | Fracción Vol Yi | Solubilidad, δ_i (MPA) ^{0.5} | δ Ponderado. δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
|--------|-----------|----------------|--------------------------|----------------------|-----------|---------------------------|--------------------|---|--|
| 1 | 26 | 0.6960 | 0.0906 | 0.0696 | 11.476 | 0.0063 | 0.0254 | 15.839 | 0.4016 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1064 | 0.0185 | 11.476 | 0.0020 | 0.0079 | 16.083 | 0.1273 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1134 | 0.0194 | 11.476 | 0.0022 | 0.0089 | 16.162 | 0.1431 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1206 | 0.0210 | 11.476 | 0.0025 | 0.0102 | 16.228 | 0.1656 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1284 | 0.0238 | 11.476 | 0.0031 | 0.0123 | 16.259 | 0.2001 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1365 | 0.0289 | 11.476 | 0.0039 | 0.0159 | 16.275 | 0.2580 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1442 | 0.0367 | 11.476 | 0.0053 | 0.0213 | 16.309 | 0.3471 |
| 8 | 142 | 0.7844 | 0.1519 | 0.0402 | 11.476 | 0.0061 | 0.0246 | 16.341 | 0.4012 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1622 | 0.0521 | 11.476 | 0.0085 | 0.0340 | 16.364 | 0.5563 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1753 | 0.0470 | 11.476 | 0.0082 | 0.0331 | 16.371 | 0.5421 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1893 | 0.0474 | 11.476 | 0.0090 | 0.0361 | 16.355 | 0.5897 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2041 | 0.0549 | 11.476 | 0.0112 | 0.0451 | 16.319 | 0.7354 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2194 | 0.0601 | 11.476 | 0.0132 | 0.0530 | 16.268 | 0.8627 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2358 | 0.0529 | 11.476 | 0.0125 | 0.0501 | 16.204 | 0.8120 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2534 | 0.0484 | 11.476 | 0.0123 | 0.0493 | 16.129 | 0.7949 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2718 | 0.0499 | 11.476 | 0.0136 | 0.0546 | 16.051 | 0.8760 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2905 | 0.0480 | 11.476 | 0.0140 | 0.0561 | 15.978 | 0.8966 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3096 | 0.0408 | 11.476 | 0.0126 | 0.0508 | 16.005 | 0.8136 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3285 | 0.0363 | 11.476 | 0.0119 | 0.0480 | 16.111 | 0.7734 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3461 | 0.0336 | 11.476 | 0.0116 | 0.0468 | 16.212 | 0.7585 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3688 | 0.0292 | 11.476 | 0.0108 | 0.0433 | 16.311 | 0.7057 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.3930 | 0.0248 | 11.476 | 0.0098 | 0.0392 | 16.408 | 0.6434 |
| 24 | 451 | 0.9444 | 0.4165 | 0.0235 | 11.476 | 0.0098 | 0.0393 | 16.501 | 0.6488 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4391 | 0.0248 | 11.476 | 0.0109 | 0.0437 | 16.590 | 0.7253 |
| 26 | 491 | 0.9623 | 0.4602 | 0.0174 | 11.476 | 0.0080 | 0.0322 | 16.672 | 0.5364 |
| 27 | 512 | 0.9707 | 0.4824 | 0.0105 | 11.476 | 0.0050 | 0.0203 | 16.757 | 0.3401 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5041 | 0.0068 | 11.476 | 0.0035 | 0.0139 | 16.837 | 0.2338 |
| 29 | 550 | 0.9875 | 0.5232 | 0.0042 | 11.476 | 0.0022 | 0.0089 | 16.904 | 0.1509 |
| 30 | 567 | 0.9957 | 0.5413 | 0.0041 | 11.476 | 0.0022 | 0.0089 | 16.964 | 0.1505 |
| 31 | 586 | 1.0030 | 0.5642 | 0.0039 | 11.476 | 0.0022 | 0.0088 | 17.035 | 0.1499 |
| 32 | 607 | 1.0092 | 0.5903 | 0.0037 | 11.476 | 0.0022 | 0.0087 | 17.110 | 0.1494 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6185 | 0.0035 | 11.476 | 0.0022 | 0.0087 | 17.183 | 0.1489 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6493 | 0.0033 | 11.476 | 0.0021 | 0.0086 | 17.255 | 0.1484 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.6831 | 0.0031 | 11.476 | 0.0021 | 0.0085 | 17.326 | 0.1479 |
| 36 | 693 | 1.0388 | 0.7253 | 0.0029 | 11.476 | 0.0021 | 0.0085 | 17.404 | 0.1473 |
| 37 | 717 | 1.0462 | 0.7784 | 0.0027 | 11.476 | 0.0021 | 0.0084 | 17.483 | 0.1468 |
| 38 | 739 | 1.0536 | 0.8327 | 0.0020 | 11.476 | 0.0017 | 0.0069 | 17.554 | 0.1203 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.35 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.13 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 48.80 |

Tabla 6 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo M

Al haber asumido el factor K_w del crudo igual que el de los pseudocomponentes, fue necesario corregir el parámetro de solubilidad δ en función de este factor K_w . Para este propósito se realizó un análisis de regresión, secuencia que se explica al detalle en la metodología (sección 2.4.2.1).

3.2 Estimación de Parámetros de Solubilidad por el Método IEC.

La estimación de los parámetros PS y PI se hizo siguiendo el procedimiento expuesto en la metodología (sección 2.3). A manera de ilustración mostramos los resultados paso a paso para el crudo E.

Se pesaron tres muestras de crudo y se disolvieron en tres volúmenes diferentes de o-xileno. Se realizó la titulación con n-heptano hasta el onset de precipitación, midiendo el volumen de este. Con el peso de cada muestra y los volúmenes de disolvente y titulante, se determinaron el Ci (concentración de dilución) y el FRi (relación de floculación) mediante las ecuaciones 11 y 12 expuestas en la sección 1.4.2. En la Tabla 7 se muestran los datos para el caso del crudo E.

| Muestra Crudo gramos | Solvente Volumen (ml) | Titulante Volumen (ml) | Ci (Concentración de Dilución) | FRi (Relación de Floculación) |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 2 | 2 | 15.8 | 0.1124 | 0.1124 |
| 2.01 | 4 | 24.8 | 0.0698 | 0.1389 |
| 2.01 | 6 | 33 | 0.0515 | 0.1538 |

Tabla 7 Cálculo del Ci y FRi para el Crudo E – Método IEC

Graficando Ci vs FRi, se determinó la ecuación de la línea de estabilidad para el crudo como se muestra en la Figura 21.

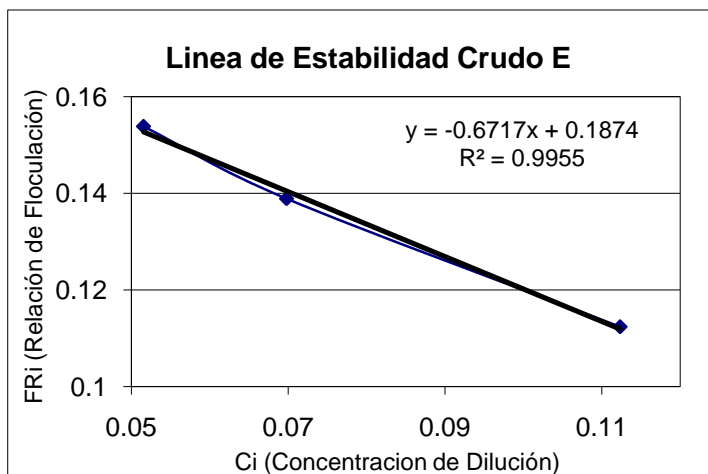


Figura 21 Línea de Estabilidad Crudo E

La intersección de la recta con el eje Y (FRmax), corresponde al PI o solubilidad requerida. Igualmente, mediante la ecuación expuesta en la tabla 1, se determinó el PS o solubilidad disponible. La metodología IEC, al ser evaluada con un disolvente y un titulante diferente al estándar Heithaus, incluye una corrección de los parámetros PI y PS mediante la expresión 27.

$$PS_{IEC} = 12 + 0.64 * PS \quad , \quad PI_{IEC} = 12 + 0.64 * PI \quad (27)$$

Después del ajuste el PS_{IEC} y PI_{IEC} son 66.98 y 23.99 respectivamente, para el crudo E.

En la Tabla 8 se muestran los datos de salida tanto del modelo por pseudocomponentes como de la metodología IEC, para el cálculo del parámetro de solubilidad de los 24 crudos evaluados en este estudio.

| | Crudo | API | Factor Kw | δ Calculado (MPa) ^{0.5} | δ Corregido (MPa) ^{0.5} | PS Calculado Modelo | PS IEC Laboratorio | Desviación | PI IEC Laboratorio | P-Value PS/PI |
|----|---------|------|-----------|--|--|------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------------|
| 1 | Crudo A | 12.2 | 11.32 | 16.89 | 17.65 | 83 | 78 | -5 | 25 | 3.15 |
| 2 | Crudo B | 18.5 | 11.03 | 17.03 | 17.51 | 80 | 78 | -2 | 35 | 2.24 |
| 3 | Crudo C | 23.5 | 11.74 | 16.38 | 16.79 | 63 | 68 | 5 | 23 | 2.93 |
| 4 | Crudo D | 21.0 | 11.67 | 16.48 | 17.00 | 68 | 68 | 0 | 40 | 1.69 |
| 5 | Crudo E | 21.3 | 11.74 | 16.42 | 16.92 | 66 | 67 | 1 | 24 | 2.79 |
| 6 | Crudo F | 18.6 | 11.51 | 16.60 | 17.05 | 69 | 67 | -2 | 40 | 1.66 |
| 7 | Crudo G | 19.3 | 11.55 | 16.56 | 17.01 | 68 | 66 | -2 | 31 | 2.12 |
| 8 | Crudo H | 25.1 | 11.99 | 16.26 | 16.91 | 66 | 64 | -2 | 24 | 2.70 |
| 9 | Crudo I | 27.7 | 11.93 | 16.21 | 16.59 | 58 | 62 | 4 | 23 | 2.67 |
| 10 | Crudo J | 28.6 | 11.75 | 16.26 | 16.39 | 54 | 62 | 8 | 35 | 1.75 |
| 11 | Crudo K | 30.6 | 12.03 | 16.07 | 16.33 | 52 | 53 | 1 | 22 | 2.44 |
| 12 | Crudo L | 29.6 | 11.53 | 16.35 | 16.25 | 50 | 52 | 2 | 36 | 1.46 |
| 13 | Crudo M | 27.7 | 11.48 | 16.35 | 16.13 | 48 | 52 | 4 | 42 | 1.22 |
| 14 | Crudo N | 29.7 | 11.59 | 16.22 | 15.95 | 43 | 49 | 6 | 37 | 1.34 |
| 15 | Crudo O | 32.1 | 11.48 | 16.32 | 16.02 | 45 | 48 | 3 | 33 | 1.46 |
| 16 | Crudo P | 29.5 | 11.72 | 16.22 | 16.20 | 49 | 48 | -1 | 22 | 2.17 |
| 17 | Crudo Q | 30.8 | 11.57 | 16.30 | 16.16 | 48 | 47 | -1 | 30 | 1.57 |
| 18 | Crudo R | 32.5 | 11.71 | 16.11 | 15.81 | 40 | 43 | 3 | 34 | 1.28 |
| 19 | Crudo S | 26.9 | 11.57 | 16.30 | 16.18 | 49 | 43 | -6 | 32 | 1.33 |
| 20 | Crudo T | 29.7 | 11.38 | 16.39 | 16.07 | 46 | 41 | -5 | - | - |
| 21 | Crudo U | 35.9 | 11.58 | 16.19 | 15.78 | 40 | 40 | 1 | 31 | 1.31 |
| 22 | Crudo V | 37.2 | 11.83 | 15.95 | 15.50 | 33 | 31 | -2 | - | - |
| 23 | Crudo W | 43.8 | 12.20 | 15.66 | 15.30 | 28 | 23 | -5 | - | - |
| 24 | Crudo X | 45.7 | 12.25 | 15.61 | 15.23 | 27 | 23 | -4 | - | - |

Tabla 8 Parámetros de Solubilidad, Modelo Pseudocomponentes vs IEC.

En la Tabla 9 se muestran los valores de repetibilidad y reproducibilidad para el PS y PI, según la norma ASTM D 7060-09 del método Heithaus.

| | PS | PI |
|---------------------|------|------|
| Repetibilidad, r | 18.1 | 9.8 |
| Reproducibilidad, R | 26 | 17.3 |

Tabla 9 Repetibilidad y Reproducibilidad del Método Heithaus

Los valores de repetibilidad del método son altos comparados con la máxima desviación de los datos PS calculados en la Tabla 8. Sin embargo debemos tener en cuenta, que la metodología Heithaus ha sido estandarizada para el uso del tolueno como disolvente, y heptano como titulante, lo que no hace muy rigurosa esta comparación.

Por esta razón se determino la repetibilidad del método IEC, haciendo tres repeticiones para tres crudos diferentes. La prueba arrojó una repetibilidad aproximada de 10, siendo 8 la máxima desviación presentada para este estudio, Tabla 8.

En las Figura 22 podemos observar de una mejor forma la eficiencia del modelo para el cálculo del parámetro de solubilidad PS.

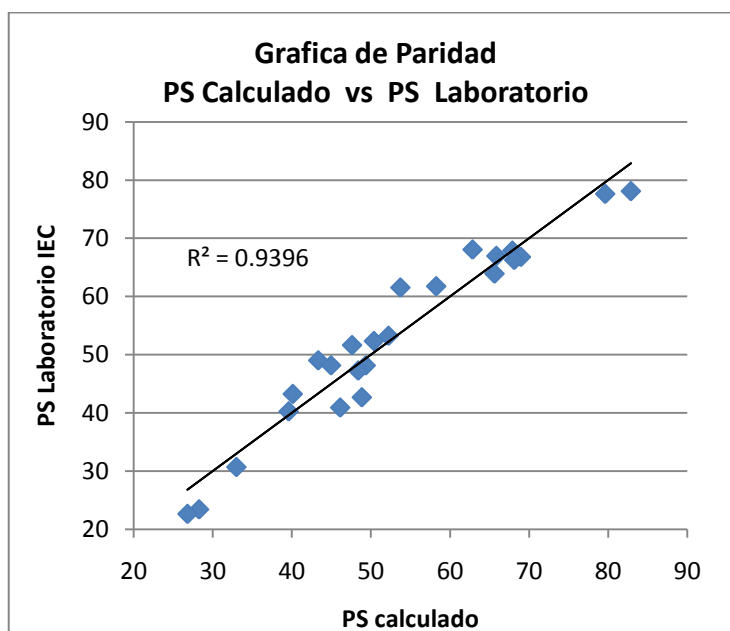


Figura 22 Gráfica de Paridad “PS Calculado vs PS Laboratorio”

En la Tabla 8 se observa que para los crudos T, V, W y X, no se tiene el valor de la solubilidad requerida PI determinado por el método manual IEC. Esto se debe a que el contenido de asfaltenos es muy bajo en estos crudos y solo se puede determinar la solubilidad disponible PS por el método automático.

Teniendo en cuenta los datos PS calculados para estos crudos, podemos concluir que el modelo arroja buenos resultados para crudos con alto y bajo contenido de asfaltenos. Dicho de otra forma, el modelo representa bien los métodos manual y automático.

3.3 Modelo para Predecir Estabilidad de Mezclas a Partir del Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos.

La estimación del parámetro de solubilidad disponible para mezclas se determinó con la ecuación 28

$$PS_{mix} = \left(\frac{V_1PS_1 + V_2PS_2 + V_3PS_3 + \dots}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots} \right) \quad (28)$$

Para la evaluación de las mezclas se utilizó el criterio de estabilidad de Wiehe (30), donde el parámetro de solubilidad disponible de la mezcla, debe ser mayor que el máximo valor del parámetro de solubilidad requerida de los crudos individuales.

En la Tabla 10 se muestran las diez mezclas seleccionadas para este trabajo y el valor máximo PI de los crudos individuales. El análisis de resultados lo enfocaremos hacia dos puntos específicos: evaluación de la reproducibilidad del modelo en cuanto al cálculo de la solubilidad disponible de mezclas, y clasificación de las mezclas de acuerdo a la máxima solubilidad requerida de la matriz de crudos analizados.

La mezcla 2 está cerca del valor de inestabilidad respecto al patrón usado (PI máximo de los crudos individuales 40), con un valor de solubilidad disponible PS de 44. Como se puede apreciar en la Tabla 10 el crudo W tiene un aporte significativo en la inestabilidad de las mezclas por tener una solubilidad disponible baja.

| Mezcla 1 | | | Mezcla 2 | | |
|----------|---------------------|----------|-----------|---------------------|----------|
| % Mezcla | Crudo | PS Crudo | % Mezcla | Crudo | PS Crudo |
| 40 | D | 68 | 15 | D | 68 |
| 20 | E | 66 | 10 | E | 66 |
| 20 | G | 68 | 15 | G | 68 |
| 20 | W | 28 | 60 | W | 28 |
| | PS Mezcla Calculado | 60 | | PS Mezcla Calculado | 44 |
| | PS Mezcla IEC | 64 | | PS Mezcla IEC | 46 |
| | PI Máximo Crudos | 40 | | PI Máximo Crudos | 40 |
| Mezcla 3 | | | Mezcla 4 | | |
| % Mezcla | Crudo | PS Crudo | % Mezcla | Crudo | PS Crudo |
| 40 | A | 83 | 10 | A | 83 |
| 20 | P | 49 | 10 | P | 49 |
| 20 | W | 28 | 60 | W | 28 |
| 20 | X | 27 | 20 | X | 27 |
| | PS Mezcla Calculado | 54 | | PS Mezcla Calculado | 36 |
| | PS Mezcla IEC | 50 | | PS Mezcla IEC | 42 |
| | PI Máximo Crudos | 25 | | PI Máximo Crudos | 25 |
| Mezcla 5 | | | Mezcla 6 | | |
| % Mezcla | Crudo | PS Crudo | % Mezcla | Crudo | PS Crudo |
| 40 | H | 66 | 10 | H | 66 |
| 20 | I | 58 | 10 | I | 58 |
| 20 | W | 28 | 70 | W | 28 |
| 20 | P | 49 | 10 | P | 49 |
| | PS Mezcla Calculado | 53 | | PS Mezcla Calculado | 37 |
| | PS Mezcla IEC | 50 | | PS Mezcla IEC | 40 |
| | PI Máximo Crudos | 24 | | PI Máximo Crudos | 24 |
| Mezcla 7 | | | Mezcla 8 | | |
| % Mezcla | Crudo | PS Crudo | % Mezcla | Crudo | PS Crudo |
| 25 | H | 66 | 10 | H | 66 |
| 25 | I | 58 | 10 | I | 58 |
| 25 | D | 68 | 70 | D | 68 |
| 25 | E | 66 | 10 | E | 66 |
| | PS Mezcla Calculado | 64 | | PS Mezcla Calculado | 66 |
| | PS Mezcla IEC | 61 | | PS Mezcla IEC | 62 |
| | PI Máximo Crudos | 40 | | PI Máximo Crudos | 40 |
| Mezcla 9 | | | Mezcla 10 | | |
| % Mezcla | Crudo | PS Crudo | % Mezcla | Crudo | PS Crudo |
| 25 | A | 83 | 10 | A | 83 |
| 25 | C | 63 | 10 | C | 63 |
| 25 | D | 68 | 70 | D | 68 |
| 25 | E | 66 | 10 | E | 66 |
| | PS Mezcla Calculado | 70 | | PS Mezcla Calculado | 69 |
| | PS Mezcla IEC | 72 | | PS Mezcla IEC | 74 |
| | PI Máximo Crudos | 40 | | PI Máximo Crudos | 40 |

Tabla 10 Solubilidad de Mezclas Evaluadas, Modelo vs Experimental.

Como se observa en la grafica de paridad Figura 23, el modelo predice de forma eficiente la solubilidad disponible PS para mezclas, teniendo una máxima desviación de 6 en la mezcla 4, valor que está dentro del intervalo de repetibilidad del método IEC, que para este estudio arrojó un valor máximo aproximado de 10.

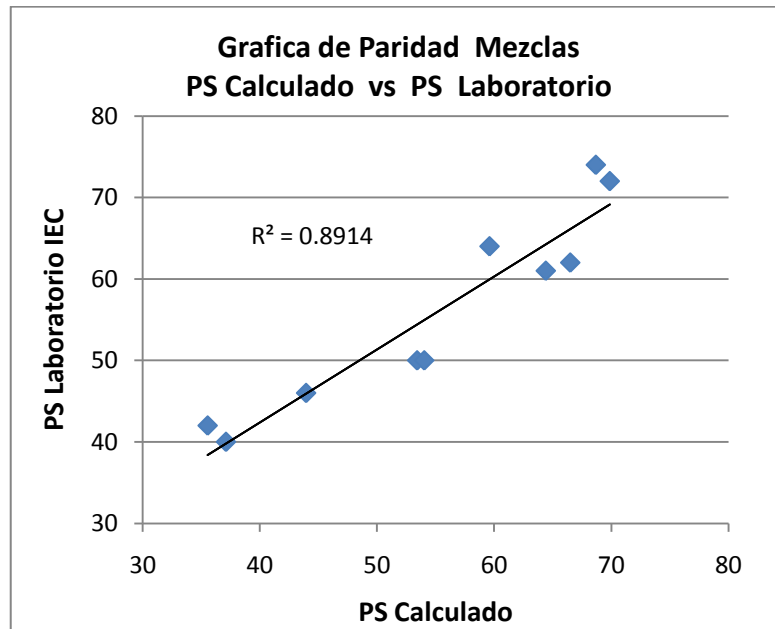


Figura 23 Gráfica de Paridad Mezclas, PS Calculado vs PS Laboratorio

En la Tabla 11 se muestra la clasificación de acuerdo al grado de estabilidad de las mezclas evaluadas en este estudio.

| Mezcla | PS Mezcla Calculado | PI Máximo | $\Delta(\text{PS-PI})$ | Estabilidad |
|-----------|---------------------|-----------|------------------------|-------------|
| Mezcla 2 | 44 | 40 | 4 | Critica |
| Mezcla 4 | 36 | 25 | 11 | Media |
| Mezcla 6 | 37 | 24 | 13 | Media |
| Mezcla 1 | 60 | 40 | 20 | Alta |
| Mezcla 7 | 64 | 40 | 24 | Alta |
| Mezcla 8 | 66 | 40 | 26 | Alta |
| Mezcla 10 | 69 | 40 | 29 | Alta |
| Mezcla 3 | 54 | 25 | 29 | Alta |
| Mezcla 5 | 53 | 24 | 29 | Alta |
| Mezcla 9 | 70 | 40 | 30 | Alta |

Tabla 11 Clasificación por Estabilidad de las Mezclas Evaluadas.

Los términos crítico, medio y alto, de acuerdo al criterio utilizado para esta clasificación, se refieren a que tan cercana esta la solubilidad disponible de la mezcla del valor máximo de solubilidad requerida de los crudos individuales. Siendo la mezcla 2 la más crítica

Con el modelo se evaluaron diferentes proporciones de mezcla para encontrar la dieta óptima en estabilidad. En la Tabla 12 se observa la sensibilidad de la proporciones de crudos en la estabilidad de esta mezcla.

| Mezcla 2 | | | | | |
|-----------------|---------------------|----------|----|----|----|
| PS Crudo | Crudo | % Mezcla | | | |
| 68 | D | 15 | 15 | 20 | 25 |
| 66 | E | 10 | 20 | 20 | 25 |
| 68 | G | 15 | 15 | 20 | 20 |
| 28 | W | 60 | 50 | 40 | 30 |
| | PS Mezcla Calculado | 44 | 48 | 52 | 56 |
| | PI Máximo Crudos | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | $\Delta(PS-PI)$ | 4 | 8 | 12 | 16 |

Tabla 12 Análisis de Proporción Óptima de Mezclado para Estabilidad de la Mezcla 4

Se observa que la relación con 30% de crudo W, es la mejor para asegurar la estabilidad de la mezcla 2. El criterio utilizado es obtener un PS de mayor magnitud, que el intervalo de repetibilidad del método experimental IEC, es decir mayor de 10.

4. CONCLUSIONES.

- Para ajustar a una representación continua y extrapolar curvas de destilación de crudos, las mejores funciones de distribución de probabilidad son en su orden, la Weibull Extreme 4 y la Riazzi 4.
- Para efectos de cálculo es recomendable el uso de funciones de distribución con un mínimo número de parámetros. De acuerdo a este criterio las mejores funciones son: la Weibull 3, Riazzi 2 y Beta 2 respectivamente.
- El modelo de cálculo desarrollado para estimar la solubilidad disponible de crudos, reproduce eficientemente el método IEC implementado en el ICP, con una máxima desviación de 8 estando esta dentro de la repetibilidad del método.
- El modelo arroja buenos resultados para crudos con alto y bajo contenido de asfaltenos, por lo que se concluye que representa bien los métodos manual y automático, usados para estimar los parámetros de solubilidad experimentalmente.
- Con la aplicación del modelo se evaluó eficientemente la estabilidad de 10 mezclas, a partir del cálculo de solubilidad disponible de los crudos individuales.
- Se generó una metodología que servirá de base para el desarrollo de un optimizador de mezclas, con restricciones de estabilidad de crudos, cumpliéndose así los objetivos planteados para este estudio.

BIBLIOGRAFÍA.

1. **Al-Douri V.A.; Rahimian I.; Zenke G.** *Hem. Ind.* 1988, 4, 39.
2. **Andersen S.I.; Pedersen C.** *Thermodynamics of Asphaltene Stability by Flocculation Titration*. Preprint of AIChE International conference on Petroleum Behavior and Fouling, 3rd International Symposium on the Thermodynamics of Asphaltenes and Heavy Oils, 1999
3. **Altgelt K.; Boduszynski M.** *Composition and Analysis of Heavy Petroleum Fractions*. Marcel Dekker, Inc. New York, 1994
4. **Barton A.F.** *Handbook of solubility Parameters and Other cohesion Parameters*. CRC Press.Inc. Boca Raton, FL, 1983
5. **Buckley, S.** *Predicting the Onset of Asphaltene Precipitation from Refractive Index Measurements*. *Energy & Fuels* 1999, pag. 328-332
6. **Burden, R.; Faires, J.** *Análisis Numérico*. Ed. Iberoamericana, México 1996, pag.135-145.
7. **Burnham K. P.; Andersson D. R.** *Model Selection and Multimodel Inference*. 2nd ed., Springer – Verlag, 1998
8. **Castro, M.; Macias, A.** *Estudio del Comportamiento de las Propiedades Fisicoquímicas y Reológicas de Mezclas de Crudos y su Relación con la Compatibilidad*. *Ecopetrol-ICP* 2004, pag. 95.
9. **Evans, M.; Hastings, N.; Peacock, B.** *Statistical distributions*; John Wiley: New York, 1993.
10. **Fahim, M.; Sakhaf, T.; y Elkilani A. S.** *Prediction of asphaltene Precipitation for Kuwaiti Crude Using Thermodynamic Micellization Model*. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, pag. 2748-2756
11. **Figueroa, D.; Ramirez, M.** *Aplicación del Concepto de Compatibilidad para Mejorar los Esquemas de Almacenamiento de Crudos*. *Ecopetrol* 2006, pag. 10-17
12. **Groenzin, H.; Mullins, O. C.** *J. Phys. Chem. A* 1999, pag. 11237-11245.

13. **Guzmán, E.; Picón, H.; Quiroga, H.; Pereira, C.** *La incompatibilidad de Crudos y su Efecto Durante su Manejo y Procesamiento.* Ecopetrol S.A – ICP, 2009.
14. **Hagen A.P.; Jones R.** *Proc.-Assoc. Asphalt Paving Technol., Sess. 1984, 53,119*
15. **Hildebrand J.H.; Prausnitz J.M.** *Regular Solution.* Van Nostrand-Reinhol Co., New York, 1970
16. **Hong, E.; Watkinson, P.** *Precipitation and Fouling in Heavy Oil-Diluent Blend.* Energy & Fuels, 1999
17. **Hong, E.; Watkinson, P.** *A Study of Asphaltene Solubility and Precipitation.* Energy & Fuels, 2004
18. **Kyeongseok, T.; Deo M.** *Asphaltene Aggregation in Organic Solvent.* Energy & Fuels 2003.
19. **Kyeongseok, O.** *Examination of Asphaltenes Precipitation and Self-Aggregation.* Energy & Fuels, 2003, pag. 508 – 509.
20. **Lian H.; Lin J.R.** *Fuel 1994, 14, 289.*
21. **Marquardt D. W.** *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 1963, 2, 431.
22. **Miller, J.; Fisher, R.; Thiyagarajan, P.; Winans, R.** *Energy Fuels;* 1998, pag. 1290-1298.
23. **Mohamed, R.; Ramos, A.; Watson, L.** *Aggregation Behavior of Two Asphaltenic Fractions in Aromatic Solvents;* Energy & Fuels 1999, pag. 323
24. **Morales, G.** *Fitting Property Curves of Crude Oils: New Approach and Implementation into CrudeExpert module,* In preparation.
25. **Murgich, J.** *Intermolecular Forces in Aggregates of Asphaltenes and Resins.* Petroleum Science And Technology, Vol. 20, Nos. 9 & 10, pag. 983–997, 2002.
26. **Ocanto, O.; Marcano, F.; Castillo J.** *Influence of Experimental Parameters on the Determination of Asphaltenes Flocculation Onset by Titration Method.* Energy & Fuels 2009
27. **Pauli A.T.;** *Asphalt compatibility Testing using the Automated Heithaus titration Test .* American Chemical Society Pre-Print , 1996

28. **Prausnitz, J.; Lichtenthaler R. y Gomes de Azevedo Edmundo.** *Termodinámica Molecular de los Equilibrios de Fases.* Prentice Hall, Madrid, 2000, pag. 254-258
29. **Riazi, M.** *Characterization and Properties of Petroleum Fraction ASTM international Standard Worldwide*, first edition. 2005, pag. 24,258,400
30. **Rogel, E.** *Asphaltene Aggregation: A molecular Thermodynamic Approach.* Langmuir. 2002, pag. 1928-1937.
31. **Rogel E.; Ovalles C.** *Asphaltene Stability in Crude Oils and Petroleum Material by Solubility Profile Analysis.* Energy & Fuels, Jul 2010.
32. **Rogel, E.** *Thermodynamic Modeling of Asphaltene Aggregation.* Langmuir 2004, pag. 1003-1012.
33. **Saleh, Z. S.; Sheikholeslami, R. and Watkinson , A. P.** *Blending Effect on Fouling of Four Crude Oils.* Energy & Fuels, 2006
34. **Sanchez, S.; Ancheyta, J.** *Comparison of Probability Distribution Functions for Fitting Distillation Curves of Petroleum.* Energy & Fuels, 2007
35. **Sheu E.** *Petroleum Asphaltenes Properties, Characterization and Issues.* Energy & Fuels 2002, pag. 74-82
36. **Strausz, O.; Mojelsky, T.** *Fuel* 1992, pag. 1355-1363.
37. **Vargas F.; Gonzalez D. Creek J.** *Development of a General Method for Modeling Asphaltene Stability.* Energy & Fuels 2008.
38. **Vicepresidencia de Exploración y Producción.** *Manejo Integral para el Desarrollo Tecnológico de los Crudos Pesados en Colombia.* Ecopetrol-ICP. pag. 1-3
39. **Wang J.X.; Buckley J.S..** Energy & Fuels 2001, 15, 1004-1012.
40. **Wauquier, J. P.** *El refino del Petróleo.* Diaz de Santos, 2003, pag. 87,152,256
41. **Wiehe, I.; Kennedy R.; Dickakian G.** *Application of the Oil Compatibility Model Refinery Streams.* Energy & Fuels 2000.
42. **Wiehe, I.; Kennedy R.;** *The Oil Compatibility Model and Crude Oil Incompatibility.* Energy & Fuels 2000.

43. **Wiehe, I.; Kennedy R.; Dickakian G.** *Fouling on Nearly Incompatible Oil.* Energy & Fuels 2003.
44. **Zhang Y.; Takanohashi T.;** *Dissolution and Dilution of Asphaltenes in Organic Solvents.* Energy & Fuels 2003, pag. 101-106

ANEXOS

ANEXO 1

Correlaciones Usadas en el Desarrollo del Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos por Pseudocomponentes.

$$\delta_i = \left(\frac{\Delta U_i^{vap}}{V_i^L} \right)^{1/2} = \left(\frac{\Delta H_i^{vap} - RT}{V_i^L} \right)^{1/2}$$

Ecuación 29. Parámetro de Solubilidad de Hildebrand para Pseudocomponentes

$$\Delta H_i^{vap} = \Delta H_{nbpi}^{vap} \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_b} \right)^{0.378}$$

Ecuación 30. Calor de Vaporización para Pseudocomponentes

$$\Delta H_{nbpi}^{vap} = RT_c T_{br} \left(\frac{3.978T_{br} - 3.958 + 1.55 \ln P_c}{1.07 - T_{br}} \right), \quad T_{br} = \frac{T_b}{T_c}$$

Ecuación 31. Calor de Vaporización para Pseudocomponentes.

$$T_c = 9.5223 [\exp(-9.134 * 10^{-4} T_b - 0.544442 SG + 6.4791 * 10^{-4} T_b SG)] T_b^{0.81067} SG^{0.53651}$$

Ecuación 32. Temperatura Crítica para Pseudocomponentes.

$$P_c = 3.1958 \cdot 10^5 [\exp(-8.505 * 10^{-3} T_b - 0.48014 SG + 5.749 * 10^{-3} T_b SG)] T_b^{0.4844} SG^{4.0846}$$

Ecuación 33. Presión Crítica para Pseudocomponentes

V_i^L : Volumen molar en fase líquida, ft³/mol.

ΔU_i^{vap} y ΔH_i^{vap} energía interna molar y calor de vaporización del componente i , J/mol

T_b = Temperatura media de ebullición, grados Kelvin.

T_c = Temperatura crítica, grados Kelvin.

T_{br} = Temperatura reducida a T_b , grados Kelvin.

T = Temperatura, grados Kelvin.

P_c = Presión Crítica, Bares

ΔH_{nbpi}^{vap} = Calor de vaporización a T_b , J/mol

R = 8.314 J/mol-K

P_c = Presión Crítica, Bares

ANEXO 2

Salida del Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad de Crudos por el Método de Pseudocomponentes.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|--------------|----------------|-----------|-------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft3/mol) | Xi | | Xi*Vi (ft3) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 16 | 0.6960 | 0.0872 | 0.1177 | 11.567 | 0.0103 | 0.0454 | 15.644 | 0.7102 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1078 | 0.0253 | 11.567 | 0.0027 | 0.0121 | 15.986 | 0.1928 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1150 | 0.0305 | 11.567 | 0.0035 | 0.0155 | 16.066 | 0.2496 |
| 4 | 87 | 0.7482 | 0.1223 | 0.0420 | 11.567 | 0.0051 | 0.0227 | 16.133 | 0.3667 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1300 | 0.0589 | 11.567 | 0.0077 | 0.0339 | 16.164 | 0.5475 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1380 | 0.0575 | 11.567 | 0.0079 | 0.0351 | 16.180 | 0.5680 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1459 | 0.0504 | 11.567 | 0.0074 | 0.0326 | 16.213 | 0.5277 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1539 | 0.0429 | 11.567 | 0.0066 | 0.0292 | 16.243 | 0.4742 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1644 | 0.0524 | 11.567 | 0.0086 | 0.0381 | 16.264 | 0.6202 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1778 | 0.0445 | 11.567 | 0.0079 | 0.0350 | 16.266 | 0.5699 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1920 | 0.0414 | 11.567 | 0.0079 | 0.0352 | 16.247 | 0.5712 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2072 | 0.0419 | 11.567 | 0.0087 | 0.0384 | 16.208 | 0.6221 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2231 | 0.0429 | 11.567 | 0.0096 | 0.0424 | 16.153 | 0.6851 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2400 | 0.0421 | 11.567 | 0.0101 | 0.0447 | 16.085 | 0.7196 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2579 | 0.0387 | 11.567 | 0.0100 | 0.0441 | 16.008 | 0.7066 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2766 | 0.0336 | 11.567 | 0.0093 | 0.0411 | 15.929 | 0.6543 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2960 | 0.0285 | 11.567 | 0.0084 | 0.0373 | 15.852 | 0.5920 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3158 | 0.0253 | 11.567 | 0.0080 | 0.0353 | 15.946 | 0.5634 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3352 | 0.0235 | 11.567 | 0.0079 | 0.0348 | 16.051 | 0.5593 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3533 | 0.0220 | 11.567 | 0.0078 | 0.0344 | 16.151 | 0.5563 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3767 | 0.0194 | 11.567 | 0.0073 | 0.0324 | 16.250 | 0.5263 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4015 | 0.0165 | 11.567 | 0.0066 | 0.0293 | 16.346 | 0.4797 |
| 24 | 451 | 0.9444 | 0.4256 | 0.0145 | 11.567 | 0.0062 | 0.0274 | 16.439 | 0.4498 |
| 25 | 472 | 0.9534 | 0.4490 | 0.0139 | 11.567 | 0.0062 | 0.0275 | 16.528 | 0.4552 |
| 26 | 493 | 0.9623 | 0.4720 | 0.0145 | 11.567 | 0.0069 | 0.0303 | 16.614 | 0.5042 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.4939 | 0.0140 | 11.567 | 0.0069 | 0.0306 | 16.695 | 0.5103 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5164 | 0.0094 | 11.567 | 0.0049 | 0.0216 | 16.775 | 0.3621 |
| 29 | 554 | 0.9875 | 0.5399 | 0.0064 | 11.567 | 0.0035 | 0.0153 | 16.854 | 0.2576 |
| 30 | 575 | 0.9957 | 0.5645 | 0.0047 | 11.567 | 0.0027 | 0.0118 | 16.931 | 0.1995 |
| 31 | 594 | 1.0030 | 0.5877 | 0.0030 | 11.567 | 0.0017 | 0.0077 | 16.999 | 0.1307 |
| 32 | 610 | 1.0092 | 0.6086 | 0.0024 | 11.567 | 0.0015 | 0.0065 | 17.056 | 0.1110 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6334 | 0.0023 | 11.567 | 0.0015 | 0.0065 | 17.118 | 0.1107 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6651 | 0.0022 | 11.567 | 0.0015 | 0.0064 | 17.190 | 0.1103 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.6997 | 0.0021 | 11.567 | 0.0014 | 0.0064 | 17.260 | 0.1100 |
| 36 | 690 | 1.0388 | 0.7379 | 0.0019 | 11.567 | 0.0014 | 0.0063 | 17.329 | 0.1096 |
| 37 | 711 | 1.0462 | 0.7833 | 0.0018 | 11.567 | 0.0014 | 0.0063 | 17.397 | 0.1092 |
| 38 | 732 | 1.0536 | 0.8350 | 0.0017 | 11.567 | 0.0014 | 0.0062 | 17.464 | 0.1089 |
| 39 | 753 | 1.0608 | 0.8895 | 0.0016 | 11.567 | 0.0014 | 0.0062 | 17.530 | 0.1086 |
| 40 | 773 | 1.0679 | 0.9467 | 0.0015 | 11.567 | 0.0014 | 0.0062 | 17.594 | 0.1082 |
| 41 | 794 | 1.0750 | 1.0066 | 0.0014 | 11.567 | 0.0014 | 0.0061 | 17.657 | 0.1079 |
| 42 | 818 | 1.0830 | 1.0783 | 0.0013 | 11.567 | 0.0014 | 0.0061 | 17.728 | 0.1075 |
| 43 | 843 | 1.0909 | 1.1534 | 0.0012 | 11.567 | 0.0014 | 0.0060 | 17.797 | 0.1072 |
| 44 | 862 | 1.0972 | 1.2136 | 0.0006 | 11.567 | 0.0008 | 0.0035 | 17.851 | 0.0620 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.30 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.16 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 48.00 |

Tabla 13 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo Q.

| Pseudo | Tbi °C | Gravedad SG | VolMolar Vi (ft3/mol) | Fracción Molar Xi | Factor Kw | Volumen, i Xi*Vi (ft3) | Fracción Vol Yi | Solubilidad, δ_i (MPA) ^{0.5} | $\delta_i \cdot Y_i$ (MPA) ^{0.5} |
|--------------------------------------|-----------|----------------|--------------------------|----------------------|-----------|---------------------------|--------------------|---|---|
| 1 | 31 | 0.6960 | 0.0962 | 0.0537 | 11.706 | 0.0052 | 0.0209 | 15.636 | 0.3263 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1099 | 0.0182 | 11.706 | 0.0020 | 0.0081 | 15.838 | 0.1283 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1171 | 0.0192 | 11.706 | 0.0022 | 0.0091 | 15.920 | 0.1445 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1245 | 0.0211 | 11.706 | 0.0026 | 0.0106 | 15.989 | 0.1694 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1326 | 0.0250 | 11.706 | 0.0033 | 0.0134 | 16.023 | 0.2146 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1410 | 0.0353 | 11.706 | 0.0050 | 0.0201 | 16.042 | 0.3230 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1491 | 0.0584 | 11.706 | 0.0087 | 0.0352 | 16.073 | 0.5654 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1569 | 0.0519 | 11.706 | 0.0081 | 0.0329 | 16.098 | 0.5297 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1678 | 0.0607 | 11.706 | 0.0102 | 0.0411 | 16.115 | 0.6631 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1818 | 0.0539 | 11.706 | 0.0098 | 0.0396 | 16.112 | 0.6380 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1965 | 0.0544 | 11.706 | 0.0107 | 0.0432 | 16.087 | 0.6956 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2122 | 0.0569 | 11.706 | 0.0121 | 0.0488 | 16.043 | 0.7834 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2288 | 0.0601 | 11.706 | 0.0137 | 0.0555 | 15.982 | 0.8877 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2463 | 0.0588 | 11.706 | 0.0145 | 0.0585 | 15.910 | 0.9306 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2649 | 0.0516 | 11.706 | 0.0137 | 0.0553 | 15.829 | 0.8747 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2845 | 0.0454 | 11.706 | 0.0129 | 0.0522 | 15.744 | 0.8214 |
| 18 | 326 | 0.8865 | 0.3048 | 0.0408 | 11.706 | 0.0124 | 0.0502 | 15.746 | 0.7905 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3254 | 0.0373 | 11.706 | 0.0121 | 0.0491 | 15.855 | 0.7778 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3455 | 0.0338 | 11.706 | 0.0117 | 0.0472 | 15.959 | 0.7533 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3644 | 0.0289 | 11.706 | 0.0105 | 0.0426 | 16.058 | 0.6838 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3891 | 0.0244 | 11.706 | 0.0095 | 0.0383 | 16.157 | 0.6190 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4153 | 0.0228 | 11.706 | 0.0095 | 0.0382 | 16.253 | 0.6216 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.4401 | 0.0229 | 11.706 | 0.0101 | 0.0407 | 16.344 | 0.6660 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4636 | 0.0156 | 11.706 | 0.0072 | 0.0292 | 16.429 | 0.4797 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4877 | 0.0097 | 11.706 | 0.0047 | 0.0190 | 16.515 | 0.3142 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.5116 | 0.0068 | 11.706 | 0.0035 | 0.0140 | 16.598 | 0.2330 |
| 28 | 531 | 0.9791 | 0.5324 | 0.0039 | 11.706 | 0.0021 | 0.0084 | 16.669 | 0.1397 |
| 29 | 547 | 0.9875 | 0.5507 | 0.0036 | 11.706 | 0.0020 | 0.0080 | 16.728 | 0.1339 |
| 30 | 565 | 0.9957 | 0.5729 | 0.0034 | 11.706 | 0.0020 | 0.0079 | 16.797 | 0.1335 |
| 31 | 586 | 1.0030 | 0.5991 | 0.0033 | 11.706 | 0.0020 | 0.0079 | 16.872 | 0.1330 |
| 32 | 607 | 1.0092 | 0.6271 | 0.0031 | 11.706 | 0.0019 | 0.0078 | 16.946 | 0.1325 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6573 | 0.0029 | 11.706 | 0.0019 | 0.0078 | 17.019 | 0.1320 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6902 | 0.0028 | 11.706 | 0.0019 | 0.0077 | 17.090 | 0.1316 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.7264 | 0.0026 | 11.706 | 0.0019 | 0.0076 | 17.159 | 0.1311 |
| 36 | 692 | 1.0388 | 0.7694 | 0.0024 | 11.706 | 0.0019 | 0.0076 | 17.233 | 0.1307 |
| 37 | 716 | 1.0462 | 0.8254 | 0.0023 | 11.706 | 0.0019 | 0.0075 | 17.311 | 0.1302 |
| 38 | 740 | 1.0536 | 0.8890 | 0.0021 | 11.706 | 0.0018 | 0.0075 | 17.388 | 0.1297 |
| 39 | 754 | 1.0608 | 0.9277 | 0.0003 | 11.706 | 0.0003 | 0.0012 | 17.431 | 0.0202 |
| δ Crudo | | | | | | | | | 16.11 |
| δ Corregido | | | | | | | | | 15.81 |
| PS Crudo | | | | | | | | | 40.12 |

Tabla 14 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo R.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|---------------------------|----------------|-----------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft ³ /mol) | Xi | | Xi*Vi (ft ³) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 13 | 0.6960 | 0.0834 | 0.0987 | 11.382 | 0.0082 | 0.0376 | 15.816 | 0.5946 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1050 | 0.0174 | 11.382 | 0.0018 | 0.0084 | 16.189 | 0.1353 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1120 | 0.0193 | 11.382 | 0.0022 | 0.0099 | 16.267 | 0.1608 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1191 | 0.0239 | 11.382 | 0.0028 | 0.0130 | 16.333 | 0.2124 |
| 5 | 101 | 0.7575 | 0.1269 | 0.0369 | 11.382 | 0.0047 | 0.0214 | 16.363 | 0.3506 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1345 | 0.0621 | 11.382 | 0.0084 | 0.0382 | 16.376 | 0.6248 |
| 7 | 127 | 0.7756 | 0.1419 | 0.0465 | 11.382 | 0.0066 | 0.0302 | 16.411 | 0.4949 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1497 | 0.0370 | 11.382 | 0.0055 | 0.0253 | 16.446 | 0.4161 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1598 | 0.0479 | 11.382 | 0.0077 | 0.0350 | 16.473 | 0.5759 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1726 | 0.0449 | 11.382 | 0.0078 | 0.0354 | 16.484 | 0.5837 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1862 | 0.0454 | 11.382 | 0.0084 | 0.0386 | 16.471 | 0.6354 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2006 | 0.0498 | 11.382 | 0.0100 | 0.0456 | 16.439 | 0.7497 |
| 14 | 243 | 0.8435 | 0.2159 | 0.0610 | 11.382 | 0.0132 | 0.0601 | 16.391 | 0.9857 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2315 | 0.0620 | 11.382 | 0.0143 | 0.0655 | 16.331 | 1.0703 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2485 | 0.0525 | 11.382 | 0.0130 | 0.0596 | 16.260 | 0.9689 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2663 | 0.0472 | 11.382 | 0.0126 | 0.0574 | 16.185 | 0.9293 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2845 | 0.0400 | 11.382 | 0.0114 | 0.0521 | 16.114 | 0.8388 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3032 | 0.0324 | 11.382 | 0.0098 | 0.0449 | 16.068 | 0.7215 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3215 | 0.0277 | 11.382 | 0.0089 | 0.0407 | 16.174 | 0.6583 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3386 | 0.0249 | 11.382 | 0.0084 | 0.0385 | 16.275 | 0.6270 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3608 | 0.0225 | 11.382 | 0.0081 | 0.0371 | 16.376 | 0.6076 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.3842 | 0.0205 | 11.382 | 0.0079 | 0.0360 | 16.473 | 0.5929 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.4068 | 0.0187 | 11.382 | 0.0076 | 0.0347 | 16.566 | 0.5742 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4287 | 0.0165 | 11.382 | 0.0071 | 0.0324 | 16.655 | 0.5395 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4499 | 0.0140 | 11.382 | 0.0063 | 0.0289 | 16.741 | 0.4833 |
| 27 | 512 | 0.9707 | 0.4707 | 0.0086 | 11.382 | 0.0040 | 0.0184 | 16.823 | 0.3099 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.4925 | 0.0052 | 11.382 | 0.0025 | 0.0116 | 16.906 | 0.1965 |
| 29 | 552 | 0.9875 | 0.5126 | 0.0029 | 11.382 | 0.0015 | 0.0069 | 16.978 | 0.1167 |
| 30 | 569 | 0.9957 | 0.5314 | 0.0027 | 11.382 | 0.0014 | 0.0066 | 17.042 | 0.1120 |
| 31 | 589 | 1.0030 | 0.5535 | 0.0026 | 11.382 | 0.0014 | 0.0065 | 17.113 | 0.1116 |
| 32 | 610 | 1.0092 | 0.5794 | 0.0024 | 11.382 | 0.0014 | 0.0065 | 17.188 | 0.1112 |
| 33 | 632 | 1.0158 | 0.6093 | 0.0023 | 11.382 | 0.0014 | 0.0064 | 17.267 | 0.1108 |
| 34 | 655 | 1.0236 | 0.6437 | 0.0022 | 11.382 | 0.0014 | 0.0064 | 17.348 | 0.1104 |
| 35 | 676 | 1.0313 | 0.6766 | 0.0014 | 11.382 | 0.0010 | 0.0044 | 17.417 | 0.0770 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.39 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.07 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 46.12 |

Tabla 15 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo T.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|---------------------------|----------------|-----------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft ³ /mol) | Xi | | Xi*Vi (ft ³) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 22 | 0.6960 | 0.0902 | 0.0765 | 11.595 | 0.0069 | 0.0274 | 15.669 | 0.4300 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1082 | 0.0172 | 11.595 | 0.0019 | 0.0074 | 15.955 | 0.1182 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1153 | 0.0180 | 11.595 | 0.0021 | 0.0082 | 16.035 | 0.1323 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1226 | 0.0194 | 11.595 | 0.0024 | 0.0095 | 16.103 | 0.1525 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1305 | 0.0221 | 11.595 | 0.0029 | 0.0115 | 16.135 | 0.1849 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1388 | 0.0273 | 11.595 | 0.0038 | 0.0151 | 16.152 | 0.2434 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1468 | 0.0368 | 11.595 | 0.0054 | 0.0215 | 16.185 | 0.3479 |
| 8 | 142 | 0.7844 | 0.1546 | 0.0426 | 11.595 | 0.0066 | 0.0262 | 16.213 | 0.4245 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1651 | 0.0534 | 11.595 | 0.0088 | 0.0351 | 16.233 | 0.5693 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1786 | 0.0469 | 11.595 | 0.0084 | 0.0333 | 16.234 | 0.5414 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1931 | 0.0467 | 11.595 | 0.0090 | 0.0359 | 16.214 | 0.5816 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2083 | 0.0536 | 11.595 | 0.0112 | 0.0444 | 16.173 | 0.7181 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2243 | 0.0606 | 11.595 | 0.0136 | 0.0541 | 16.117 | 0.8712 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2413 | 0.0582 | 11.595 | 0.0140 | 0.0559 | 16.049 | 0.8966 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2594 | 0.0552 | 11.595 | 0.0143 | 0.0569 | 15.971 | 0.9095 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2783 | 0.0534 | 11.595 | 0.0149 | 0.0591 | 15.890 | 0.9389 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2978 | 0.0475 | 11.595 | 0.0141 | 0.0563 | 15.817 | 0.8901 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3177 | 0.0408 | 11.595 | 0.0130 | 0.0516 | 15.927 | 0.8222 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3372 | 0.0362 | 11.595 | 0.0122 | 0.0486 | 16.032 | 0.7798 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3555 | 0.0320 | 11.595 | 0.0114 | 0.0452 | 16.132 | 0.7292 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3791 | 0.0269 | 11.595 | 0.0102 | 0.0406 | 16.231 | 0.6592 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4044 | 0.0236 | 11.595 | 0.0095 | 0.0379 | 16.328 | 0.6192 |
| 24 | 451 | 0.9444 | 0.4288 | 0.0232 | 11.595 | 0.0099 | 0.0395 | 16.421 | 0.6491 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4515 | 0.0221 | 11.595 | 0.0100 | 0.0397 | 16.506 | 0.6551 |
| 26 | 491 | 0.9623 | 0.4742 | 0.0137 | 11.595 | 0.0065 | 0.0258 | 16.591 | 0.4279 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.4973 | 0.0088 | 11.595 | 0.0044 | 0.0174 | 16.675 | 0.2900 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5194 | 0.0058 | 11.595 | 0.0030 | 0.0121 | 16.752 | 0.2021 |
| 29 | 550 | 0.9875 | 0.5389 | 0.0038 | 11.595 | 0.0021 | 0.0082 | 16.818 | 0.1385 |
| 30 | 566 | 0.9957 | 0.5576 | 0.0037 | 11.595 | 0.0021 | 0.0082 | 16.878 | 0.1381 |
| 31 | 586 | 1.0030 | 0.5819 | 0.0035 | 11.595 | 0.0020 | 0.0081 | 16.951 | 0.1376 |
| 32 | 607 | 1.0092 | 0.6090 | 0.0033 | 11.595 | 0.0020 | 0.0081 | 17.025 | 0.1371 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6382 | 0.0031 | 11.595 | 0.0020 | 0.0080 | 17.098 | 0.1366 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6701 | 0.0030 | 11.595 | 0.0020 | 0.0079 | 17.169 | 0.1362 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.7050 | 0.0028 | 11.595 | 0.0020 | 0.0079 | 17.240 | 0.1357 |
| 36 | 691 | 1.0388 | 0.7446 | 0.0026 | 11.595 | 0.0020 | 0.0078 | 17.310 | 0.1353 |
| 37 | 714 | 1.0462 | 0.7978 | 0.0024 | 11.595 | 0.0019 | 0.0078 | 17.388 | 0.1348 |
| 38 | 739 | 1.0536 | 0.8589 | 0.0022 | 11.595 | 0.0019 | 0.0077 | 17.465 | 0.1343 |
| 39 | 757 | 1.0608 | 0.9092 | 0.0012 | 11.595 | 0.0011 | 0.0042 | 17.524 | 0.0736 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.22 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 15.95 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 43.34 |

Tabla 16 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo N.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|---------------------------|----------------|-----------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft ³ /mol) | Xi | | Xi*Vi (ft ³) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 35 | 0.6960 | 0.0997 | 0.0536 | 11.832 | 0.0053 | 0.0231 | 15.537 | 0.3582 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1117 | 0.0238 | 11.832 | 0.0027 | 0.0115 | 15.712 | 0.1805 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1191 | 0.0271 | 11.832 | 0.0032 | 0.0139 | 15.796 | 0.2197 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1267 | 0.0345 | 11.832 | 0.0044 | 0.0189 | 15.868 | 0.2992 |
| 5 | 101 | 0.7575 | 0.1350 | 0.0545 | 11.832 | 0.0073 | 0.0317 | 15.904 | 0.5046 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1428 | 0.0669 | 11.832 | 0.0096 | 0.0413 | 15.924 | 0.6570 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1512 | 0.0531 | 11.832 | 0.0080 | 0.0347 | 15.953 | 0.5528 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1598 | 0.0457 | 11.832 | 0.0073 | 0.0315 | 15.977 | 0.5031 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1710 | 0.0612 | 11.832 | 0.0105 | 0.0452 | 15.989 | 0.7227 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1852 | 0.0562 | 11.832 | 0.0104 | 0.0449 | 15.982 | 0.7180 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.2003 | 0.0530 | 11.832 | 0.0106 | 0.0458 | 15.952 | 0.7314 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2165 | 0.0514 | 11.832 | 0.0111 | 0.0480 | 15.903 | 0.7638 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2337 | 0.0511 | 11.832 | 0.0119 | 0.0515 | 15.838 | 0.8161 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2520 | 0.0513 | 11.832 | 0.0129 | 0.0558 | 15.760 | 0.8801 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2712 | 0.0488 | 11.832 | 0.0132 | 0.0571 | 15.675 | 0.8948 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2915 | 0.0432 | 11.832 | 0.0126 | 0.0543 | 15.587 | 0.8468 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.3125 | 0.0367 | 11.832 | 0.0115 | 0.0496 | 15.665 | 0.7766 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3339 | 0.0314 | 11.832 | 0.0105 | 0.0453 | 15.774 | 0.7139 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3550 | 0.0275 | 11.832 | 0.0098 | 0.0422 | 15.878 | 0.6702 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3748 | 0.0247 | 11.832 | 0.0093 | 0.0400 | 15.977 | 0.6388 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.4004 | 0.0222 | 11.832 | 0.0089 | 0.0383 | 16.075 | 0.6158 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4273 | 0.0198 | 11.832 | 0.0085 | 0.0366 | 16.169 | 0.5921 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.4534 | 0.0173 | 11.832 | 0.0078 | 0.0338 | 16.260 | 0.5501 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4785 | 0.0145 | 11.832 | 0.0069 | 0.0299 | 16.347 | 0.4893 |
| 26 | 491 | 0.9623 | 0.5026 | 0.0088 | 11.832 | 0.0044 | 0.0192 | 16.429 | 0.3154 |
| 27 | 512 | 0.9707 | 0.5277 | 0.0052 | 11.832 | 0.0028 | 0.0119 | 16.512 | 0.1972 |
| 28 | 531 | 0.9791 | 0.5502 | 0.0030 | 11.832 | 0.0016 | 0.0071 | 16.585 | 0.1170 |
| 29 | 549 | 0.9875 | 0.5712 | 0.0027 | 11.832 | 0.0015 | 0.0067 | 16.650 | 0.1113 |
| 30 | 568 | 0.9957 | 0.5953 | 0.0026 | 11.832 | 0.0015 | 0.0066 | 16.720 | 0.1109 |
| 31 | 589 | 1.0030 | 0.6230 | 0.0024 | 11.832 | 0.0015 | 0.0066 | 16.796 | 0.1105 |
| 32 | 611 | 1.0092 | 0.6547 | 0.0023 | 11.832 | 0.0015 | 0.0065 | 16.874 | 0.1100 |
| 33 | 635 | 1.0158 | 0.6907 | 0.0022 | 11.832 | 0.0015 | 0.0065 | 16.954 | 0.1096 |
| 34 | 654 | 1.0236 | 0.7233 | 0.0013 | 11.832 | 0.0009 | 0.0040 | 17.020 | 0.0680 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 15.95 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 15.50 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 32.99 |

Tabla 17 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo V.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|--------------|----------------|-----------|-------------|--------------|--------------------------------------|---|
| | °C | SG | Vi (ft3/mol) | Xi | | Xi*Vi (ft3) | Yi | (MPA) ^{0.5} | $\delta_i \cdot Y_i$ (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 17 | 0.6960 | 0.0875 | 0.1167 | 11.576 | 0.0102 | 0.0509 | 15.638 | 0.7953 |
| 2 | 59 | 0.7282 | 0.1080 | 0.0274 | 11.576 | 0.0030 | 0.0148 | 15.976 | 0.2357 |
| 3 | 73 | 0.7383 | 0.1152 | 0.0355 | 11.576 | 0.0041 | 0.0204 | 16.056 | 0.3268 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1225 | 0.0510 | 11.576 | 0.0063 | 0.0311 | 16.123 | 0.5016 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1301 | 0.0599 | 11.576 | 0.0078 | 0.0388 | 16.154 | 0.6271 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1382 | 0.0608 | 11.576 | 0.0084 | 0.0418 | 16.170 | 0.6761 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1461 | 0.0570 | 11.576 | 0.0083 | 0.0414 | 16.203 | 0.6714 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1542 | 0.0504 | 11.576 | 0.0078 | 0.0387 | 16.233 | 0.6283 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1646 | 0.0652 | 11.576 | 0.0107 | 0.0534 | 16.253 | 0.8682 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1780 | 0.0554 | 11.576 | 0.0099 | 0.0491 | 16.255 | 0.7985 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1923 | 0.0493 | 11.576 | 0.0095 | 0.0471 | 16.236 | 0.7653 |
| 13 | 221 | 0.8320 | 0.2074 | 0.0457 | 11.576 | 0.0095 | 0.0472 | 16.196 | 0.7644 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2235 | 0.0434 | 11.576 | 0.0097 | 0.0483 | 16.141 | 0.7790 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2405 | 0.0415 | 11.576 | 0.0100 | 0.0496 | 16.073 | 0.7980 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2583 | 0.0372 | 11.576 | 0.0096 | 0.0478 | 15.996 | 0.7648 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2771 | 0.0307 | 11.576 | 0.0085 | 0.0423 | 15.916 | 0.6732 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2967 | 0.0258 | 11.576 | 0.0077 | 0.0382 | 15.839 | 0.6045 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3165 | 0.0231 | 11.576 | 0.0073 | 0.0365 | 15.940 | 0.5810 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3359 | 0.0211 | 11.576 | 0.0071 | 0.0354 | 16.044 | 0.5672 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3539 | 0.0184 | 11.576 | 0.0065 | 0.0324 | 16.144 | 0.5227 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3774 | 0.0152 | 11.576 | 0.0057 | 0.0285 | 16.243 | 0.4625 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4024 | 0.0127 | 11.576 | 0.0051 | 0.0254 | 16.340 | 0.4155 |
| 24 | 451 | 0.9444 | 0.4266 | 0.0113 | 11.576 | 0.0048 | 0.0240 | 16.432 | 0.3944 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4500 | 0.0106 | 11.576 | 0.0048 | 0.0237 | 16.521 | 0.3910 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4726 | 0.0098 | 11.576 | 0.0046 | 0.0231 | 16.606 | 0.3837 |
| 27 | 512 | 0.9707 | 0.4946 | 0.0064 | 11.576 | 0.0032 | 0.0159 | 16.686 | 0.2647 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5178 | 0.0041 | 11.576 | 0.0021 | 0.0105 | 16.768 | 0.1758 |
| 29 | 552 | 0.9875 | 0.5392 | 0.0024 | 11.576 | 0.0013 | 0.0064 | 16.840 | 0.1085 |
| 30 | 570 | 0.9957 | 0.5591 | 0.0020 | 11.576 | 0.0011 | 0.0057 | 16.904 | 0.0964 |
| 31 | 588 | 1.0030 | 0.5816 | 0.0020 | 11.576 | 0.0011 | 0.0057 | 16.971 | 0.0961 |
| 32 | 608 | 1.0092 | 0.6078 | 0.0019 | 11.576 | 0.0011 | 0.0056 | 17.043 | 0.0958 |
| 33 | 630 | 1.0158 | 0.6381 | 0.0018 | 11.576 | 0.0011 | 0.0056 | 17.118 | 0.0954 |
| 34 | 652 | 1.0236 | 0.6732 | 0.0017 | 11.576 | 0.0011 | 0.0055 | 17.196 | 0.0951 |
| 35 | 676 | 1.0313 | 0.7134 | 0.0015 | 11.576 | 0.0011 | 0.0055 | 17.275 | 0.0947 |
| 36 | 696 | 1.0388 | 0.7520 | 0.0010 | 11.576 | 0.0008 | 0.0039 | 17.342 | 0.0672 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.19 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 15.78 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 39.59 |

Tabla 18 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo U.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|------|----------|--------------|----------------|-----------|-------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft3/mol) | Xi | | Xi*Vi (ft3) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 23 | 0.6960 | 0.0835 | 0.0860 | 11.032 | 0.0072 | 0.0313 | 16.338 | 0.5116 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.0996 | 0.0207 | 11.032 | 0.0021 | 0.0090 | 16.607 | 0.1492 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1062 | 0.0230 | 11.032 | 0.0024 | 0.0107 | 16.683 | 0.1779 |
| 4 | 87 | 0.7482 | 0.1131 | 0.0302 | 11.032 | 0.0034 | 0.0149 | 16.748 | 0.2495 |
| 5 | 102 | 0.7575 | 0.1213 | 0.1413 | 11.032 | 0.0171 | 0.0747 | 16.776 | 1.2531 |
| 6 | 113 | 0.7666 | 0.1270 | 0.0699 | 11.032 | 0.0089 | 0.0387 | 16.785 | 0.6492 |
| 7 | 127 | 0.7756 | 0.1344 | 0.0426 | 11.032 | 0.0057 | 0.0250 | 16.827 | 0.4200 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1415 | 0.0337 | 11.032 | 0.0048 | 0.0208 | 16.872 | 0.3504 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1507 | 0.0418 | 11.032 | 0.0063 | 0.0275 | 16.912 | 0.4645 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1623 | 0.0357 | 11.032 | 0.0058 | 0.0252 | 16.937 | 0.4274 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1746 | 0.0319 | 11.032 | 0.0056 | 0.0243 | 16.940 | 0.4114 |
| 13 | 221 | 0.8320 | 0.1876 | 0.0297 | 11.032 | 0.0056 | 0.0243 | 16.922 | 0.4113 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2014 | 0.0289 | 11.032 | 0.0058 | 0.0254 | 16.886 | 0.4290 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2159 | 0.0293 | 11.032 | 0.0063 | 0.0276 | 16.836 | 0.4639 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2312 | 0.0291 | 11.032 | 0.0067 | 0.0294 | 16.776 | 0.4924 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2471 | 0.0277 | 11.032 | 0.0069 | 0.0299 | 16.710 | 0.4991 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2635 | 0.0251 | 11.032 | 0.0066 | 0.0288 | 16.647 | 0.4797 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.2802 | 0.0227 | 11.032 | 0.0064 | 0.0277 | 16.596 | 0.4599 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.2966 | 0.0214 | 11.032 | 0.0063 | 0.0276 | 16.568 | 0.4576 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3120 | 0.0211 | 11.032 | 0.0066 | 0.0286 | 16.583 | 0.4750 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3319 | 0.0212 | 11.032 | 0.0070 | 0.0306 | 16.623 | 0.5091 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.3528 | 0.0202 | 11.032 | 0.0071 | 0.0311 | 16.722 | 0.5194 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.3729 | 0.0179 | 11.032 | 0.0067 | 0.0291 | 16.816 | 0.4891 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.3926 | 0.0152 | 11.032 | 0.0060 | 0.0261 | 16.907 | 0.4410 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4121 | 0.0139 | 11.032 | 0.0057 | 0.0249 | 16.996 | 0.4239 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.4315 | 0.0140 | 11.032 | 0.0060 | 0.0262 | 17.083 | 0.4484 |
| 28 | 534 | 0.9791 | 0.4513 | 0.0164 | 11.032 | 0.0074 | 0.0323 | 17.168 | 0.5543 |
| 29 | 555 | 0.9875 | 0.4708 | 0.0206 | 11.032 | 0.0097 | 0.0422 | 17.247 | 0.7278 |
| 30 | 575 | 0.9957 | 0.4909 | 0.0156 | 11.032 | 0.0077 | 0.0334 | 17.323 | 0.5793 |
| 31 | 596 | 1.0030 | 0.5132 | 0.0100 | 11.032 | 0.0051 | 0.0224 | 17.401 | 0.3896 |
| 32 | 617 | 1.0092 | 0.5372 | 0.0071 | 11.032 | 0.0038 | 0.0165 | 17.478 | 0.2886 |
| 33 | 638 | 1.0158 | 0.5634 | 0.0054 | 11.032 | 0.0030 | 0.0132 | 17.553 | 0.2309 |
| 34 | 659 | 1.0236 | 0.5920 | 0.0043 | 11.032 | 0.0025 | 0.0110 | 17.626 | 0.1938 |
| 35 | 680 | 1.0313 | 0.6234 | 0.0035 | 11.032 | 0.0022 | 0.0095 | 17.698 | 0.1680 |
| 36 | 700 | 1.0388 | 0.6581 | 0.0029 | 11.032 | 0.0019 | 0.0084 | 17.769 | 0.1489 |
| 37 | 721 | 1.0462 | 0.7015 | 0.0025 | 11.032 | 0.0017 | 0.0075 | 17.839 | 0.1342 |
| 38 | 741 | 1.0536 | 0.7444 | 0.0018 | 11.032 | 0.0014 | 0.0060 | 17.903 | 0.1071 |
| 39 | 758 | 1.0608 | 0.7843 | 0.0015 | 11.032 | 0.0012 | 0.0051 | 17.959 | 0.0910 |
| 40 | 775 | 1.0679 | 0.8247 | 0.0014 | 11.032 | 0.0012 | 0.0050 | 18.012 | 0.0908 |
| 41 | 794 | 1.0750 | 0.8729 | 0.0013 | 11.032 | 0.0011 | 0.0050 | 18.072 | 0.0905 |
| 42 | 815 | 1.0830 | 0.9268 | 0.0012 | 11.032 | 0.0011 | 0.0050 | 18.136 | 0.0902 |
| 43 | 836 | 1.0909 | 0.9828 | 0.0012 | 11.032 | 0.0011 | 0.0049 | 18.198 | 0.0900 |
| 44 | 857 | 1.0972 | 1.0395 | 0.0011 | 11.032 | 0.0011 | 0.0049 | 18.259 | 0.0897 |
| 45 | 878 | 0.6994 | 1.0980 | 0.0010 | 11.032 | 0.0011 | 0.0049 | 18.318 | 0.0895 |
| 46 | 898 | 0.7195 | 1.1582 | 0.0010 | 11.032 | 0.0011 | 0.0049 | 18.376 | 0.0892 |
| 47 | 919 | 0.7294 | 1.2201 | 0.0009 | 11.032 | 0.0011 | 0.0048 | 18.434 | 0.0890 |
| 48 | 940 | 0.7391 | 1.2838 | 0.0009 | 11.032 | 0.0011 | 0.0048 | 18.490 | 0.0887 |
| 49 | 1018 | 0.7485 | 1.5359 | 0.0043 | 11.032 | 0.0067 | 0.0291 | 18.691 | 0.5430 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 17.03 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 17.51 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 79.62 |

Tabla 19 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo B.

| Pseudo | Tbi °C | Gravedad SG | VolMolar Vi (ft3/mol) | Fracción Molar Xi | Factor Kw | Volumen, i Xi*Vi (ft3) | Fracción Vol Yi | Solubilidad, δ_i (MPA) ^{0.5} | $\delta_i * Y_i$ (MPA) ^{0.5} |
|--------|-----------|----------------|--------------------------|----------------------|-----------|---------------------------|--------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | 26 | 0.6960 | 0.0908 | 0.0710 | 11.475 | 0.0064 | 0.0301 | 15.845 | 0.4771 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1064 | 0.0203 | 11.475 | 0.0022 | 0.0101 | 16.085 | 0.1622 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1135 | 0.0233 | 11.475 | 0.0026 | 0.0124 | 16.164 | 0.1996 |
| 4 | 87 | 0.7482 | 0.1209 | 0.0330 | 11.475 | 0.0040 | 0.0186 | 16.231 | 0.3020 |
| 5 | 101 | 0.7575 | 0.1289 | 0.0869 | 11.475 | 0.0112 | 0.0523 | 16.262 | 0.8510 |
| 6 | 113 | 0.7666 | 0.1359 | 0.0641 | 11.475 | 0.0087 | 0.0407 | 16.275 | 0.6623 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1440 | 0.0457 | 11.475 | 0.0066 | 0.0307 | 16.309 | 0.5007 |
| 8 | 142 | 0.7844 | 0.1519 | 0.0410 | 11.475 | 0.0062 | 0.0291 | 16.342 | 0.4753 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1623 | 0.0626 | 11.475 | 0.0102 | 0.0474 | 16.366 | 0.7762 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1752 | 0.0609 | 11.475 | 0.0107 | 0.0498 | 16.372 | 0.8159 |
| 12 | 200 | 0.8201 | 0.1889 | 0.0520 | 11.475 | 0.0098 | 0.0459 | 16.356 | 0.7509 |
| 13 | 221 | 0.8320 | 0.2037 | 0.0460 | 11.475 | 0.0094 | 0.0437 | 16.321 | 0.7140 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2195 | 0.0455 | 11.475 | 0.0100 | 0.0467 | 16.269 | 0.7594 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2360 | 0.0476 | 11.475 | 0.0112 | 0.0525 | 16.204 | 0.8505 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2533 | 0.0458 | 11.475 | 0.0116 | 0.0541 | 16.131 | 0.8730 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2715 | 0.0409 | 11.475 | 0.0111 | 0.0519 | 16.053 | 0.8328 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2904 | 0.0360 | 11.475 | 0.0104 | 0.0488 | 15.980 | 0.7795 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3094 | 0.0301 | 11.475 | 0.0093 | 0.0434 | 16.005 | 0.6953 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3282 | 0.0241 | 11.475 | 0.0079 | 0.0370 | 16.111 | 0.5959 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3460 | 0.0206 | 11.475 | 0.0071 | 0.0333 | 16.212 | 0.5394 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3691 | 0.0196 | 11.475 | 0.0072 | 0.0338 | 16.313 | 0.5519 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.3931 | 0.0206 | 11.475 | 0.0081 | 0.0379 | 16.409 | 0.6220 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.4154 | 0.0151 | 11.475 | 0.0063 | 0.0293 | 16.498 | 0.4839 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4382 | 0.0094 | 11.475 | 0.0041 | 0.0192 | 16.588 | 0.3184 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4605 | 0.0065 | 11.475 | 0.0030 | 0.0140 | 16.675 | 0.2342 |
| 27 | 510 | 0.9707 | 0.4800 | 0.0038 | 11.475 | 0.0018 | 0.0086 | 16.749 | 0.1440 |
| 28 | 526 | 0.9791 | 0.4969 | 0.0033 | 11.475 | 0.0017 | 0.0078 | 16.812 | 0.1304 |
| 29 | 544 | 0.9875 | 0.5164 | 0.0032 | 11.475 | 0.0016 | 0.0077 | 16.881 | 0.1300 |
| 30 | 565 | 0.9957 | 0.5396 | 0.0030 | 11.475 | 0.0016 | 0.0076 | 16.960 | 0.1295 |
| 31 | 586 | 1.0030 | 0.5640 | 0.0029 | 11.475 | 0.0016 | 0.0076 | 17.036 | 0.1290 |
| 32 | 607 | 1.0092 | 0.5901 | 0.0027 | 11.475 | 0.0016 | 0.0075 | 17.111 | 0.1285 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6183 | 0.0026 | 11.475 | 0.0016 | 0.0075 | 17.184 | 0.1281 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6491 | 0.0024 | 11.475 | 0.0016 | 0.0074 | 17.256 | 0.1276 |
| 35 | 670 | 1.0313 | 0.6837 | 0.0023 | 11.475 | 0.0016 | 0.0073 | 17.328 | 0.1272 |
| 36 | 694 | 1.0388 | 0.7266 | 0.0021 | 11.475 | 0.0016 | 0.0073 | 17.408 | 0.1267 |
| 37 | 718 | 1.0462 | 0.7805 | 0.0020 | 11.475 | 0.0015 | 0.0072 | 17.487 | 0.1263 |
| 38 | 736 | 1.0536 | 0.8258 | 0.0010 | 11.475 | 0.0008 | 0.0037 | 17.546 | 0.0651 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.32 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.02 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 44.96 |

Tabla 20 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo O.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|--------------|----------------|-----------|-------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft3/mol) | Xi | | Xi*Vi (ft3) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 22 | 0.6960 | 0.0894 | 0.0819 | 11.532 | 0.0073 | 0.0313 | 15.738 | 0.4925 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1073 | 0.0190 | 11.532 | 0.0020 | 0.0087 | 16.023 | 0.1398 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1144 | 0.0208 | 11.532 | 0.0024 | 0.0102 | 16.102 | 0.1639 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1217 | 0.0250 | 11.532 | 0.0030 | 0.0130 | 16.170 | 0.2103 |
| 5 | 101 | 0.7575 | 0.1297 | 0.0378 | 11.532 | 0.0049 | 0.0210 | 16.201 | 0.3401 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1376 | 0.0756 | 11.532 | 0.0104 | 0.0445 | 16.216 | 0.7213 |
| 7 | 127 | 0.7756 | 0.1450 | 0.0581 | 11.532 | 0.0084 | 0.0360 | 16.248 | 0.5855 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1531 | 0.0452 | 11.532 | 0.0069 | 0.0296 | 16.280 | 0.4815 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1636 | 0.0592 | 11.532 | 0.0097 | 0.0415 | 16.302 | 0.6760 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1769 | 0.0565 | 11.532 | 0.0100 | 0.0427 | 16.306 | 0.6966 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1909 | 0.0534 | 11.532 | 0.0102 | 0.0436 | 16.288 | 0.7104 |
| 13 | 221 | 0.8320 | 0.2057 | 0.0489 | 11.532 | 0.0101 | 0.0430 | 16.251 | 0.6990 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2216 | 0.0453 | 11.532 | 0.0100 | 0.0430 | 16.197 | 0.6961 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2385 | 0.0444 | 11.532 | 0.0106 | 0.0453 | 16.129 | 0.7300 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2562 | 0.0434 | 11.532 | 0.0111 | 0.0476 | 16.054 | 0.7642 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2745 | 0.0372 | 11.532 | 0.0102 | 0.0437 | 15.976 | 0.6987 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.2938 | 0.0300 | 11.532 | 0.0088 | 0.0377 | 15.900 | 0.5993 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3134 | 0.0261 | 11.532 | 0.0082 | 0.0351 | 15.969 | 0.5598 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3327 | 0.0246 | 11.532 | 0.0082 | 0.0350 | 16.075 | 0.5632 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3505 | 0.0236 | 11.532 | 0.0083 | 0.0353 | 16.174 | 0.5717 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3736 | 0.0207 | 11.532 | 0.0077 | 0.0331 | 16.273 | 0.5386 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.3981 | 0.0173 | 11.532 | 0.0069 | 0.0294 | 16.369 | 0.4810 |
| 24 | 451 | 0.9444 | 0.4220 | 0.0150 | 11.532 | 0.0063 | 0.0271 | 16.462 | 0.4459 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4452 | 0.0143 | 11.532 | 0.0063 | 0.0272 | 16.552 | 0.4495 |
| 26 | 493 | 0.9623 | 0.4679 | 0.0150 | 11.532 | 0.0070 | 0.0299 | 16.638 | 0.4979 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.4896 | 0.0144 | 11.532 | 0.0070 | 0.0301 | 16.719 | 0.5034 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5118 | 0.0098 | 11.532 | 0.0050 | 0.0214 | 16.799 | 0.3594 |
| 29 | 554 | 0.9875 | 0.5351 | 0.0066 | 11.532 | 0.0036 | 0.0152 | 16.879 | 0.2568 |
| 30 | 575 | 0.9957 | 0.5594 | 0.0049 | 11.532 | 0.0027 | 0.0117 | 16.956 | 0.1992 |
| 31 | 594 | 1.0030 | 0.5825 | 0.0031 | 11.532 | 0.0018 | 0.0078 | 17.025 | 0.1327 |
| 32 | 610 | 1.0092 | 0.6034 | 0.0025 | 11.532 | 0.0015 | 0.0064 | 17.082 | 0.1099 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6277 | 0.0024 | 11.532 | 0.0015 | 0.0064 | 17.143 | 0.1096 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6590 | 0.0023 | 11.532 | 0.0015 | 0.0063 | 17.215 | 0.1092 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.6933 | 0.0021 | 11.532 | 0.0015 | 0.0063 | 17.285 | 0.1088 |
| 36 | 690 | 1.0388 | 0.7310 | 0.0020 | 11.532 | 0.0015 | 0.0063 | 17.354 | 0.1085 |
| 37 | 711 | 1.0462 | 0.7760 | 0.0019 | 11.532 | 0.0015 | 0.0062 | 17.423 | 0.1081 |
| 38 | 732 | 1.0536 | 0.8272 | 0.0017 | 11.532 | 0.0014 | 0.0062 | 17.490 | 0.1078 |
| 39 | 753 | 1.0608 | 0.8812 | 0.0016 | 11.532 | 0.0014 | 0.0061 | 17.556 | 0.1075 |
| 40 | 773 | 1.0679 | 0.9378 | 0.0015 | 11.532 | 0.0014 | 0.0061 | 17.620 | 0.1071 |
| 41 | 794 | 1.0750 | 0.9970 | 0.0014 | 11.532 | 0.0014 | 0.0060 | 17.683 | 0.1068 |
| 42 | 818 | 1.0830 | 1.0655 | 0.0013 | 11.532 | 0.0014 | 0.0060 | 17.751 | 0.1065 |
| 43 | 842 | 1.0909 | 1.1397 | 0.0012 | 11.532 | 0.0014 | 0.0060 | 17.821 | 0.1061 |
| 44 | 864 | 1.0972 | 1.2094 | 0.0010 | 11.532 | 0.0012 | 0.0050 | 17.884 | 0.0893 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.35 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.25 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 50.38 |

Tabla 21 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo L.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|--------------|----------------|-----------|-------------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft3/mol) | Xi | | Xi*Vi (ft3) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 15 | 0.6960 | 0.0883 | 0.1042 | 11.717 | 0.0092 | 0.0369 | 15.465 | 0.5707 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1100 | 0.0194 | 11.717 | 0.0021 | 0.0086 | 15.827 | 0.1356 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1173 | 0.0215 | 11.717 | 0.0025 | 0.0101 | 15.909 | 0.1605 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1248 | 0.0263 | 11.717 | 0.0033 | 0.0131 | 15.979 | 0.2100 |
| 5 | 101 | 0.7575 | 0.1330 | 0.0402 | 11.717 | 0.0053 | 0.0214 | 16.013 | 0.3433 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1410 | 0.0704 | 11.717 | 0.0099 | 0.0398 | 16.031 | 0.6382 |
| 7 | 127 | 0.7756 | 0.1488 | 0.0530 | 11.717 | 0.0079 | 0.0316 | 16.061 | 0.5075 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1572 | 0.0414 | 11.717 | 0.0065 | 0.0261 | 16.088 | 0.4203 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1682 | 0.0531 | 11.717 | 0.0089 | 0.0358 | 16.104 | 0.5759 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1821 | 0.0489 | 11.717 | 0.0089 | 0.0357 | 16.101 | 0.5752 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1968 | 0.0470 | 11.717 | 0.0093 | 0.0371 | 16.075 | 0.5964 |
| 13 | 221 | 0.8320 | 0.2124 | 0.0451 | 11.717 | 0.0096 | 0.0384 | 16.031 | 0.6154 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2291 | 0.0430 | 11.717 | 0.0098 | 0.0395 | 15.970 | 0.6304 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2468 | 0.0408 | 11.717 | 0.0101 | 0.0404 | 15.897 | 0.6418 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2655 | 0.0386 | 11.717 | 0.0102 | 0.0411 | 15.815 | 0.6493 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2851 | 0.0357 | 11.717 | 0.0102 | 0.0408 | 15.730 | 0.6422 |
| 18 | 325 | 0.8865 | 0.3054 | 0.0316 | 11.717 | 0.0097 | 0.0387 | 15.739 | 0.6095 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3260 | 0.0272 | 11.717 | 0.0089 | 0.0356 | 15.848 | 0.5641 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3465 | 0.0244 | 11.717 | 0.0085 | 0.0339 | 15.952 | 0.5407 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3656 | 0.0234 | 11.717 | 0.0085 | 0.0342 | 16.052 | 0.5494 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3902 | 0.0230 | 11.717 | 0.0090 | 0.0360 | 16.151 | 0.5810 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4160 | 0.0208 | 11.717 | 0.0086 | 0.0346 | 16.245 | 0.5625 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.4410 | 0.0170 | 11.717 | 0.0075 | 0.0301 | 16.336 | 0.4909 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4656 | 0.0139 | 11.717 | 0.0065 | 0.0259 | 16.424 | 0.4251 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4897 | 0.0124 | 11.717 | 0.0061 | 0.0244 | 16.510 | 0.4030 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.5136 | 0.0121 | 11.717 | 0.0062 | 0.0250 | 16.593 | 0.4145 |
| 28 | 534 | 0.9791 | 0.5377 | 0.0130 | 11.717 | 0.0070 | 0.0280 | 16.674 | 0.4666 |
| 29 | 554 | 0.9875 | 0.5613 | 0.0117 | 11.717 | 0.0065 | 0.0262 | 16.749 | 0.4393 |
| 30 | 575 | 0.9957 | 0.5867 | 0.0080 | 11.717 | 0.0047 | 0.0188 | 16.825 | 0.3166 |
| 31 | 596 | 1.0030 | 0.6140 | 0.0056 | 11.717 | 0.0034 | 0.0138 | 16.900 | 0.2335 |
| 32 | 617 | 1.0092 | 0.6432 | 0.0042 | 11.717 | 0.0027 | 0.0109 | 16.974 | 0.1846 |
| 33 | 636 | 1.0158 | 0.6724 | 0.0028 | 11.717 | 0.0019 | 0.0077 | 17.040 | 0.1306 |
| 34 | 653 | 1.0236 | 0.6991 | 0.0021 | 11.717 | 0.0015 | 0.0059 | 17.096 | 0.1003 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.7285 | 0.0020 | 11.717 | 0.0015 | 0.0058 | 17.152 | 0.1000 |
| 36 | 690 | 1.0388 | 0.7683 | 0.0019 | 11.717 | 0.0014 | 0.0058 | 17.220 | 0.0997 |
| 37 | 711 | 1.0462 | 0.8158 | 0.0018 | 11.717 | 0.0014 | 0.0057 | 17.288 | 0.0993 |
| 38 | 732 | 1.0536 | 0.8698 | 0.0016 | 11.717 | 0.0014 | 0.0057 | 17.354 | 0.0990 |
| 39 | 753 | 1.0608 | 0.9267 | 0.0015 | 11.717 | 0.0014 | 0.0057 | 17.419 | 0.0987 |
| 40 | 773 | 1.0679 | 0.9864 | 0.0014 | 11.717 | 0.0014 | 0.0056 | 17.483 | 0.0984 |
| 41 | 794 | 1.0750 | 1.0487 | 0.0013 | 11.717 | 0.0014 | 0.0056 | 17.545 | 0.0981 |
| 42 | 815 | 1.0830 | 1.1136 | 0.0012 | 11.717 | 0.0014 | 0.0056 | 17.606 | 0.0978 |
| 43 | 836 | 1.0909 | 1.1807 | 0.0012 | 11.717 | 0.0014 | 0.0055 | 17.666 | 0.0975 |
| 44 | 857 | 1.0972 | 1.2482 | 0.0011 | 11.717 | 0.0014 | 0.0055 | 17.724 | 0.0972 |
| 45 | 879 | 0.6994 | 1.3211 | 0.0010 | 11.717 | 0.0014 | 0.0055 | 17.784 | 0.0970 |
| 46 | 903 | 0.7195 | 1.4039 | 0.0010 | 11.717 | 0.0014 | 0.0054 | 17.849 | 0.0966 |
| 47 | 927 | 0.7294 | 1.4899 | 0.0009 | 11.717 | 0.0013 | 0.0054 | 17.913 | 0.0963 |
| 48 | 942 | 0.7391 | 1.5441 | 0.0002 | 11.717 | 0.0003 | 0.0012 | 17.952 | 0.0221 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.22 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.20 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 49.34 |

Tabla 22 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo K.

| Pseudo | Tbi °C | Gravedad SG | VolMolar Vi (ft3/mol) | Fracción Molar Xi | Factor Kw | Volumen, i Xi*Vi (ft3) | Fracción Vol Yi | Solubilidad, δ_i (MPA) ^{0.5} | $\delta_i * Y_i$ (MPA) ^{0.5} |
|--------|-----------|----------------|--------------------------|----------------------|-----------|---------------------------|--------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | 28 | 0.6960 | 0.0929 | 0.0609 | 11.575 | 0.0057 | 0.0208 | 15.749 | 0.3283 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1079 | 0.0173 | 11.575 | 0.0019 | 0.0069 | 15.976 | 0.1099 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1150 | 0.0177 | 11.575 | 0.0020 | 0.0075 | 16.056 | 0.1207 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1223 | 0.0186 | 11.575 | 0.0023 | 0.0084 | 16.123 | 0.1349 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1301 | 0.0199 | 11.575 | 0.0026 | 0.0095 | 16.155 | 0.1541 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1383 | 0.0221 | 11.575 | 0.0031 | 0.0113 | 16.172 | 0.1820 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1463 | 0.0258 | 11.575 | 0.0038 | 0.0139 | 16.205 | 0.2254 |
| 8 | 142 | 0.7844 | 0.1543 | 0.0314 | 11.575 | 0.0048 | 0.0178 | 16.235 | 0.2896 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1648 | 0.0538 | 11.575 | 0.0089 | 0.0327 | 16.255 | 0.5315 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1780 | 0.0489 | 11.575 | 0.0087 | 0.0321 | 16.257 | 0.5214 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1923 | 0.0456 | 11.575 | 0.0088 | 0.0323 | 16.237 | 0.5245 |
| 13 | 222 | 0.8320 | 0.2075 | 0.0461 | 11.575 | 0.0096 | 0.0352 | 16.198 | 0.5708 |
| 14 | 243 | 0.8435 | 0.2237 | 0.0520 | 11.575 | 0.0116 | 0.0428 | 16.142 | 0.6913 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2406 | 0.0586 | 11.575 | 0.0141 | 0.0519 | 16.074 | 0.8350 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2583 | 0.0577 | 11.575 | 0.0149 | 0.0550 | 15.998 | 0.8793 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2772 | 0.0535 | 11.575 | 0.0148 | 0.0546 | 15.917 | 0.8694 |
| 18 | 326 | 0.8865 | 0.2966 | 0.0492 | 11.575 | 0.0146 | 0.0538 | 15.841 | 0.8523 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3163 | 0.0440 | 11.575 | 0.0139 | 0.0513 | 15.941 | 0.8184 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3358 | 0.0392 | 11.575 | 0.0132 | 0.0485 | 16.046 | 0.7782 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3540 | 0.0374 | 11.575 | 0.0133 | 0.0488 | 16.146 | 0.7887 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3774 | 0.0358 | 11.575 | 0.0135 | 0.0498 | 16.245 | 0.8092 |
| 23 | 429 | 0.9352 | 0.4020 | 0.0282 | 11.575 | 0.0113 | 0.0418 | 16.339 | 0.6831 |
| 24 | 450 | 0.9444 | 0.4262 | 0.0211 | 11.575 | 0.0090 | 0.0332 | 16.432 | 0.5458 |
| 25 | 471 | 0.9534 | 0.4498 | 0.0184 | 11.575 | 0.0083 | 0.0306 | 16.522 | 0.5051 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4729 | 0.0186 | 11.575 | 0.0088 | 0.0324 | 16.609 | 0.5381 |
| 27 | 513 | 0.9707 | 0.4951 | 0.0193 | 11.575 | 0.0095 | 0.0351 | 16.690 | 0.5864 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5174 | 0.0132 | 11.575 | 0.0068 | 0.0251 | 16.769 | 0.4215 |
| 29 | 554 | 0.9875 | 0.5410 | 0.0086 | 11.575 | 0.0047 | 0.0172 | 16.848 | 0.2892 |
| 30 | 575 | 0.9957 | 0.5656 | 0.0062 | 11.575 | 0.0035 | 0.0130 | 16.926 | 0.2192 |
| 31 | 593 | 1.0030 | 0.5881 | 0.0036 | 11.575 | 0.0021 | 0.0077 | 16.991 | 0.1310 |
| 32 | 609 | 1.0092 | 0.6084 | 0.0033 | 11.575 | 0.0020 | 0.0074 | 17.046 | 0.1263 |
| 33 | 628 | 1.0158 | 0.6348 | 0.0031 | 11.575 | 0.0020 | 0.0074 | 17.112 | 0.1259 |
| 34 | 648 | 1.0236 | 0.6665 | 0.0030 | 11.575 | 0.0020 | 0.0073 | 17.184 | 0.1255 |
| 35 | 669 | 1.0313 | 0.7012 | 0.0028 | 11.575 | 0.0020 | 0.0072 | 17.254 | 0.1251 |
| 36 | 690 | 1.0388 | 0.7395 | 0.0026 | 11.575 | 0.0020 | 0.0072 | 17.323 | 0.1247 |
| 37 | 711 | 1.0462 | 0.7850 | 0.0025 | 11.575 | 0.0019 | 0.0071 | 17.391 | 0.1243 |
| 38 | 732 | 1.0536 | 0.8368 | 0.0023 | 11.575 | 0.0019 | 0.0071 | 17.458 | 0.1239 |
| 39 | 753 | 1.0608 | 0.8914 | 0.0021 | 11.575 | 0.0019 | 0.0070 | 17.524 | 0.1235 |
| 40 | 775 | 1.0679 | 0.9539 | 0.0020 | 11.575 | 0.0019 | 0.0070 | 17.593 | 0.1231 |
| 41 | 799 | 1.0750 | 1.0236 | 0.0018 | 11.575 | 0.0019 | 0.0069 | 17.666 | 0.1226 |
| 42 | 824 | 1.0830 | 1.0971 | 0.0017 | 11.575 | 0.0019 | 0.0069 | 17.737 | 0.1222 |
| 43 | 836 | 1.0909 | 1.1360 | 0.0000 | 11.575 | 0.0000 | 0.0002 | 17.773 | 0.0029 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.30 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.18 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 48.85 |

Tabla 23 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo S.

| Pseudo | Tbi | Gravedad | VolMolar | Fracción Molar | Factor Kw | Volumen, i | Fracción Vol | Solubilidad, δ_i | δ Ponderado. |
|--------|-----|----------|--------------|----------------|-----------|-------------|--------------|-------------------------|-------------------------------------|
| | °C | SG | Vi (ft3/mol) | Xi | | Xi*Vi (ft3) | Yi | (MPA) ^{0.5} | δ_i*Y_i (MPA) ^{0.5} |
| 1 | 13 | 0.6960 | 0.0878 | 0.1028 | 11.747 | 0.0090 | 0.0337 | 15.411 | 0.5187 |
| 2 | 58 | 0.7282 | 0.1105 | 0.0199 | 11.747 | 0.0022 | 0.0082 | 15.797 | 0.1295 |
| 3 | 72 | 0.7383 | 0.1178 | 0.0230 | 11.747 | 0.0027 | 0.0101 | 15.879 | 0.1608 |
| 4 | 86 | 0.7482 | 0.1253 | 0.0297 | 11.747 | 0.0037 | 0.0139 | 15.950 | 0.2215 |
| 5 | 100 | 0.7575 | 0.1334 | 0.0434 | 11.747 | 0.0058 | 0.0216 | 15.984 | 0.3451 |
| 6 | 114 | 0.7666 | 0.1413 | 0.0514 | 11.747 | 0.0073 | 0.0271 | 16.002 | 0.4340 |
| 7 | 128 | 0.7756 | 0.1495 | 0.0436 | 11.747 | 0.0065 | 0.0243 | 16.032 | 0.3901 |
| 8 | 141 | 0.7844 | 0.1579 | 0.0383 | 11.747 | 0.0061 | 0.0226 | 16.058 | 0.3628 |
| 9 | 159 | 0.7952 | 0.1689 | 0.0514 | 11.747 | 0.0087 | 0.0324 | 16.073 | 0.5205 |
| 11 | 180 | 0.8079 | 0.1829 | 0.0470 | 11.747 | 0.0086 | 0.0321 | 16.069 | 0.5153 |
| 12 | 201 | 0.8201 | 0.1977 | 0.0440 | 11.747 | 0.0087 | 0.0325 | 16.042 | 0.5209 |
| 13 | 221 | 0.8320 | 0.2135 | 0.0418 | 11.747 | 0.0089 | 0.0333 | 15.997 | 0.5324 |
| 14 | 242 | 0.8435 | 0.2303 | 0.0402 | 11.747 | 0.0093 | 0.0345 | 15.935 | 0.5504 |
| 15 | 263 | 0.8547 | 0.2482 | 0.0387 | 11.747 | 0.0096 | 0.0358 | 15.860 | 0.5685 |
| 16 | 284 | 0.8655 | 0.2671 | 0.0370 | 11.747 | 0.0099 | 0.0369 | 15.777 | 0.5817 |
| 17 | 305 | 0.8761 | 0.2869 | 0.0349 | 11.747 | 0.0100 | 0.0374 | 15.692 | 0.5872 |
| 18 | 326 | 0.8865 | 0.3073 | 0.0323 | 11.747 | 0.0099 | 0.0371 | 15.720 | 0.5831 |
| 19 | 346 | 0.8967 | 0.3281 | 0.0293 | 11.747 | 0.0096 | 0.0359 | 15.829 | 0.5678 |
| 20 | 367 | 0.9067 | 0.3486 | 0.0262 | 11.747 | 0.0091 | 0.0342 | 15.932 | 0.5442 |
| 21 | 388 | 0.9164 | 0.3679 | 0.0236 | 11.747 | 0.0087 | 0.0324 | 16.032 | 0.5190 |
| 22 | 409 | 0.9259 | 0.3927 | 0.0209 | 11.747 | 0.0082 | 0.0306 | 16.130 | 0.4941 |
| 23 | 430 | 0.9352 | 0.4192 | 0.0190 | 11.747 | 0.0080 | 0.0297 | 16.226 | 0.4826 |
| 24 | 451 | 0.9444 | 0.4448 | 0.0189 | 11.747 | 0.0084 | 0.0314 | 16.318 | 0.5126 |
| 25 | 472 | 0.9534 | 0.4699 | 0.0219 | 11.747 | 0.0103 | 0.0384 | 16.407 | 0.6302 |
| 26 | 492 | 0.9623 | 0.4936 | 0.0286 | 11.747 | 0.0141 | 0.0528 | 16.490 | 0.8704 |
| 27 | 512 | 0.9707 | 0.5164 | 0.0212 | 11.747 | 0.0109 | 0.0408 | 16.569 | 0.6768 |
| 28 | 533 | 0.9791 | 0.5408 | 0.0131 | 11.747 | 0.0071 | 0.0264 | 16.650 | 0.4401 |
| 29 | 554 | 0.9875 | 0.5657 | 0.0092 | 11.747 | 0.0052 | 0.0194 | 16.728 | 0.3246 |
| 30 | 575 | 0.9957 | 0.5917 | 0.0070 | 11.747 | 0.0042 | 0.0155 | 16.805 | 0.2607 |
| 31 | 596 | 1.0030 | 0.6191 | 0.0056 | 11.747 | 0.0035 | 0.0130 | 16.880 | 0.2203 |
| 32 | 617 | 1.0092 | 0.6485 | 0.0047 | 11.747 | 0.0030 | 0.0113 | 16.953 | 0.1923 |
| 33 | 638 | 1.0158 | 0.6805 | 0.0040 | 11.747 | 0.0027 | 0.0101 | 17.025 | 0.1717 |
| 34 | 657 | 1.0236 | 0.7132 | 0.0030 | 11.747 | 0.0021 | 0.0080 | 17.091 | 0.1370 |
| 35 | 675 | 1.0313 | 0.7448 | 0.0024 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.149 | 0.1165 |
| 36 | 692 | 1.0388 | 0.7782 | 0.0023 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.204 | 0.1169 |
| 37 | 711 | 1.0462 | 0.8225 | 0.0022 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.266 | 0.1173 |
| 38 | 732 | 1.0536 | 0.8769 | 0.0021 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.332 | 0.1178 |
| 39 | 753 | 1.0608 | 0.9343 | 0.0019 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.397 | 0.1182 |
| 40 | 773 | 1.0679 | 0.9946 | 0.0018 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.461 | 0.1186 |
| 41 | 794 | 1.0750 | 1.0575 | 0.0017 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.523 | 0.1191 |
| 42 | 815 | 1.0830 | 1.1228 | 0.0016 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.584 | 0.1195 |
| 43 | 836 | 1.0909 | 1.1905 | 0.0015 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.643 | 0.1199 |
| 44 | 857 | 1.0972 | 1.2586 | 0.0014 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.702 | 0.1203 |
| 45 | 879 | 0.6994 | 1.3326 | 0.0014 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.762 | 0.1207 |
| 46 | 902 | 0.7195 | 1.4126 | 0.0013 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.824 | 0.1211 |
| 47 | 925 | 0.7294 | 1.4955 | 0.0012 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.886 | 0.1215 |
| 48 | 949 | 0.7391 | 1.5812 | 0.0012 | 11.747 | 0.0018 | 0.0068 | 17.946 | 0.1219 |
| 49 | 963 | 0.7485 | 1.6337 | 0.0002 | 11.747 | 0.0004 | 0.0013 | 17.982 | 0.0238 |
| | | | | | | | | δ Crudo | 16.26 |
| | | | | | | | | δ Corregido | 16.39 |
| | | | | | | | | PS Crudo | 53.72 |

Tabla 24 Salida Modelo de Cálculo del Parámetro de Solubilidad, Crudo J.