

**Prediccion de la viscosidad en la preparacion del crudo Castilla Norte, por medio de
análisis multivariable**

Jorge Eliecer Cañas Benavides

**Trabajo de grado para optar el título de:
Ingeniero de Procesos de Refinación y Petroquímica**

Director

PhD. Luis Javier López Giraldo

Tutor

Ing. Aldemar Figueroa Loza

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedico este proyecto a toda mi familia.

A Mis hijos Jorge Eliecer y Julieth Paola, cuando nos proponemos metas, estas se cumplirán siempre y cuando exista la voluntad, si se planean para tener un mejor futuro y una vida llena de éxitos, junto a una vejes digna.

A mi señora esposa Sandra Milena, por estar siempre apoyándome en esta etapa de mi vida.

Jorge Eliécer Cañas Benavides

Agradecimientos

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

El director del proyecto PhD. Luis Javier Lopez Giraldo por su gran aporte y orientación para la realización de este proyecto.

El Tutor del proyecto Ing. Aldemer Figueroa Loza por su valioso apoyo en el desarrollo y aplicación de este proyecto.

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivo específico	18
2. Marco conceptual	19
2.1 Componentes de la mezcla del crudo codiluido	21
2.1.1 Fondos de vacío	21
2.1.2 Crudo reducido	22
2.1.3 Nafta virgen	22
2.1.4 Crudo base k964	22
2.1.5 Tanques de almacenamiento para ventas K-965, y K-966.	23
3. Estado del arte	24
4. Metodología	31
4.1 Diagrama de flujo	31
4.2 Análisis que se realizan en el laboratorio	32
4.2.1 Viscosidad cinemática	32
4.2.2 Viscosidad de asfaltos	33
4.2.3 Penetración	33
4.2.4 Densidad y gravedad API	34
4.3 Toma de datos	34
4.4 Analisis y numeración de datos	35

<i>4.5 Desarrollo</i>	35
<i>4.6 Ajuste a los parámetros del modelo predictivo</i>	36
<i>4.7 Validación del modelo</i>	38
<i>5. Resultados</i>	39
<i>5. Conclusiones</i>	59
<i>6. Recomendaciones</i>	60
<i>Referencias bibliográficas</i>	61

Lista de tablas

Tabla 1. *Métodos más comunes para la predicción de mezclas*

29

Lista de figuras

Figura 1. <i>Representación esquemática del proceso de preparación del crudo Castilla Norte codiluido en casas bombas ocho.</i>	16
Figura 1. <i>Diagrama de flujo</i>	32
Figura 2. <i>Tabla base de datos (análisis de datos)</i>	35
Figura 3. <i>Gráfico comparativo entre viscosidad y penetración de fondos U -2000</i>	39
Figura 4. <i>Correlación de variables (análisis de variables)</i>	40
Figura 5. <i>Gráfico de tendencias</i>	40
Figura 6. <i>Diagrama de cajas y bigotes</i>	41
Figura 7. <i>Rangos de distribución de los componentes</i>	42
Figura 8. <i>Gráfico de la media y desviación estándar</i>	43
Figura 9. <i>Valores de la media y desviación estándar</i>	43
Figura 10. <i>Tendencia de la mezcla con respecto a la viscosidad</i>	44
Figura 11. <i>Viscosidad Baja y alta</i>	45
Figura 12. <i>Tendencia de la mezcla con respecto a la nafta</i>	46
Figura 13. <i>Tendencia de la mezcla con respecto al fondo</i>	47
Figura 14. <i>Tendencia de la mezcla con respecto al crudo</i>	48
Figura 15. <i>Tendencia de la mezcla con respecto al k964</i>	49
Figura 16. <i>La varianza explicada</i>	50
Figura 17. <i>Histograma de fondo</i>	50
Figura 18. <i>Histograma de nafta</i>	51
Figura 19. <i>Histograma de crudo</i>	51

Figura 20. <i>Histograma de k964</i>	52
Figura 21. <i>Gráfico de Kennard Stone</i>	53
Figura 22. <i>Validación cruzada software The Unescrambler</i>	54
Figura 23. <i>Gráfico de predicción vs referencia</i>	55
Figura 24. <i>Grafico de Validación del modelo</i>	56
Figura 25. <i>Resultados del modelo</i>	58

Glosario

Viscosidad: Se conoce como viscosidad la propiedad de los fluidos que muestran una resistencia al cambio durante su desplazamiento. Es dependiente de la temperatura y es constante según las condiciones físicas en que se encuentre.

Centistokes (cSt): Es una unidad de medición que se utiliza para describir la viscosidad de un producto.

GLP: Gas licuado del petróleo

ASTM: American Society for Testing and Materials

RVP: Es un análisis de laboratorio, que mide la presión en términos de libras por pulgada cuadrada (psi).

Labvantage: Software de información a plantas de los análisis realizados en el laboratorio, base de datos.

VIT: vicepresidencia de transporte

PLSR: Regresión de mínimos cuadrados parciales

RMSE: Error cuadrático medio

THE UNSCRAMBLER: Software integral para análisis multivariado de datos.

ACPM: Aceite Combustible Para Motores

ALC: Aceite Liviano De Ciclo

PI SYSTEM: sistema de información en plantas

API (American Petroleum Institute): la gravedad API es una unidad de medida de densidad.

Resumen

Título: Predicción de la viscosidad en la preparación del crudo castilla norte, por medio de análisis multivariable.*

Autor: Jorge Eliecer Cañas Benavides**

Palabras claves. Unscrambler, viscosidad, mezclas.

Descripción

Dada la importancia que tiene la venta del crudo codiluido en la refinería de ECOPETROL S.A., ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, como solución a la evacuación de una gran parte de los fondos de vacío, que a su vez generan una utilidad económica, está en la búsqueda constante de mejorar el consumo de nafta virgen que es dosificada a la corriente del crudo codiluido, como producto de venta en la refinería. Nafta que hace parte en la preparación del crudo codiluido, cuyos análisis de laboratorio son realizados usando los métodos de ensayo vigentes de normas internacionales de la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Con la importancia del valor comercial de la nafta usada en el proceso, y de acuerdo con el direccionamiento operacional en la toma de decisiones, surge la necesidad de buscar una

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química Director. PhD. Luis Javier López Giraldo.
Tutor Ing. Aldemar Figueroa Loza

herramienta de tipo predictiva, que permita conocer con anterioridad al proceso, la cantidad ideal de nafta requerida para la dosificación en la mezcla durante el proceso operacional, sin afectar la viscosidad de la mezcla.

El estudio toma la base de datos de los resultados analíticos obtenidos en el laboratorio, y almacenados en el sistema de información Labvantage, y sistema PI de plantas. La variabilidad que tiene la viscosidad en la mezcla para su aceptación bajo los parámetros establecidos en el control operacional es lo de controlar para su almacenamiento en tanques de ventas. En este trabajo de grado se logra realizar un análisis multivariable, usando como herramienta el software the UNSCRAMBLER, se desarrolla un modelo predictivo de optimización para la preparación de la mezcla. Se encuentra un modelo predictivo, usando la técnica de regresión por mínimos cuadrados parciales, obteniendo un margen de error promedio cuadrático de 0,035, para el cálculo de la viscosidad, que corresponde al modelo predicho. Como resultado se obtiene un modelo del log de la viscosidad, luego se aplica el antilogaritmo, para obtener la viscosidad.

Abstract

Title: Prediction of viscosity in the elaboration of crudo castilla North, through multivariable analysis.*

Author: Jorge Eliecer Cañas Benavides**

Keywords. Positioner, viscosity, mixtures.

Description:

Given the importance of the sale of co-diluted crude in the refinery of ECOPETROL S.A., located in the city of Barrancabermeja, as a solution to the evacuation of a large part of the vacuum funds, which in turn generates a utility the economy is in constant search to improve the consumption of virgin gasoline that. It is dosed to the co-diluted crude stream, as a product for sale at the refinery. Naphtha is part of the preparation of co-diluted crude, whose analysis of The laboratory is carried out using the current test methods of standards standards of the ASTM (American Society for Testing and Materials).

With the importance of the commercial value of the naphtha used in the process, and by operational management in decision-making, the need arises to look for a predictive type of tool, which allows

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering Director. PhD. Luis Javier Lopez Giraldo. Tutor Ing. Aldemar Figueroa Loza

knowing before the process, the ideal amount of naphtha required for dosing in the mixture during the operational process, without affecting the viscosity of the mixture.

The study takes the database of the analytical results obtained in the laboratory, and stores it in the Labvantage information system, and plant PI system. The variability that the viscosity has in the mixture for its acceptance under the parameters established in the operational control is to control for its storage in sales tanks.

In this degree work, it is possible to carry out a multivariate analysis, using the UNSCRAMBELL software as a tool, and a model is developed for predictive optimization for mix preparation. found a model predictive, using the partial least squares regression technique, obtaining a margin of error squared average of 0,035, for the calculation of the viscosity, that corresponds to the predicted pattern. As a result, a model of the log of the viscosity, then the antilog is applied to obtain the viscosity.

Introducción

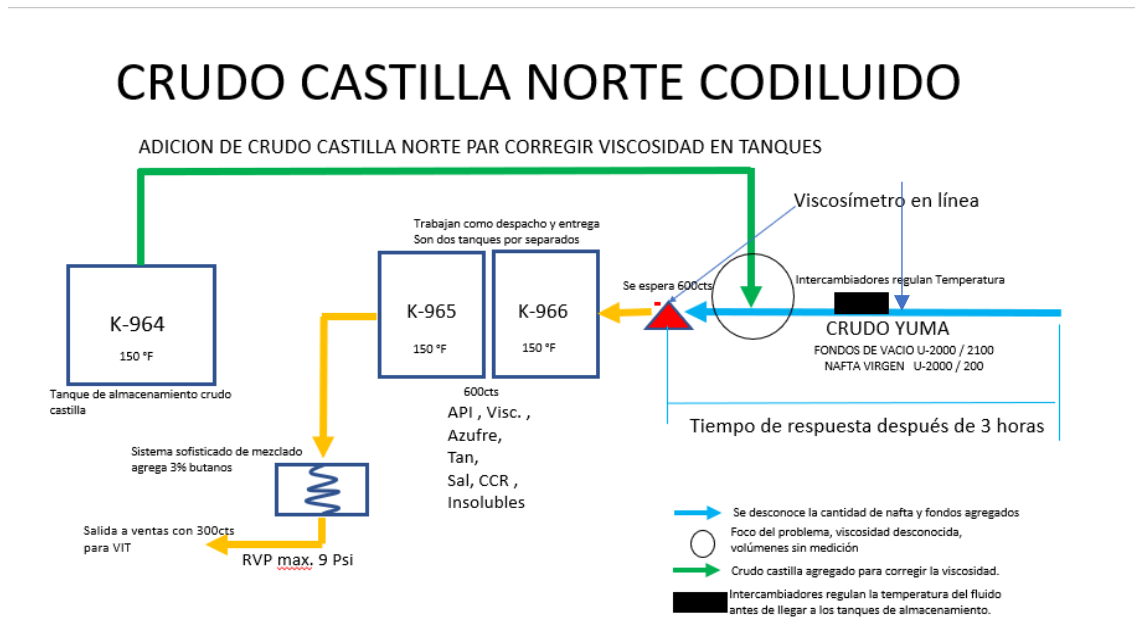
La refinería de Barrancabermeja, ECOPETROL S.A. (Empresa Colombiana de Petróleos), es la compañía más grande del país, tiene la capacidad de recibir 230 barriles por día de crudo, de los cuales la mayoría son crudos pesados, que según su dieta es suministrada a las topping generando una gran cantidad de fondos; los cuales a su vez causan un impacto negativo en los esquemas locativos de las unidades de almacenamiento. Debido al alto stock de fondos en los tanques de almacenamiento de fondos, y a la caída del precio del barril de crudo a nivel mundial en los años 2014-2015, un poco antes de la pandemia del COVID 19, se hace necesario buscar una alternativa que permita la evacuación de una gran parte de fondos, por todo lo anterior se replantea el esquema para dar solución al manejo de evacuación de los fondos.

El esquema operacional tomaba una parte de los fondos y eran enviados como asfalto, aproximadamente 30% y la otra cantidad 70% de fondos, se destinaban a la preparación de combustóleo pesado y liviano. Para la preparación del combustóleo liviano se necesitaba un volumen de ALC (Aceite Liviano De Ciclo) materia prima importante que a su vez es de gran valor, porque si se direccionaba a la producción de ACPM (Aceite Combustible Para Motores), generaba un mejor margen de ganancias. Margen que no se podía obtener con este esquema de operación del momento. Teniendo en cuenta lo anterior, nace el nuevo esquema de operacional para el tratamiento de los fondos, que a su vez permitiría obtener una mejor rentabilidad como producto de venta, también permitiría la evacuación de una gran parte de ellos, que ya se estaba convirtiendo en un problema para la empresa y a su vez, se dejaría de usar ALC (Aceite Liviano De Ciclo), que sería redireccionado a la producción de ACPM(Aceite Combustible Para Motores), aumentando el volumen de producción en ACPM, obteniendo una rentabilidad en la empresa. Es

así que la estrategia implementada en casa bombas ocho (Figura 1.), prepara para ventas el crudo Yuma, nombre que recibe al momento de su preparación, producto de una mezcla, donde se involucran las corrientes de naftas, fondos de la unidad 2000, crudo reducido y crudo base (tanque de almacenamiento k-964); la mezcla del crudo codiluido nombre que recibe después de su preparación, debe cumplir con una especificación en viscosidad, que va desde 400 cSt (centistokes) hasta 600 cSt. Además, los crudos en los tanques deben llegar con una temperatura de 60 °C o 140 ° F, como parámetro de control para el almacenamiento. También se debe tener un RVP (Presión de vapor Reid) máx. de 9psi.

Figura 1.

Representación esquemática del proceso de preparación del crudo Castilla Norte codiluido en casas bombas ocho.



En la actualidad no se cuenta con una herramienta que permita predecir la dosificación más cercana a la viscosidad requerida, lo que hace que haya un mayor consumo de la nafta virgen

A esto se debe que la viscosidad fluctúe, y la cantidad de nafta que se usa durante la operación sea variable y no se tenga un control asegurado para su dosificación. Por lo tanto se formuló la siguiente pregunta de investigación: ¿Será posible obtener el porcentaje ideal de nafta, para la dosificación en la mezcla que garantice una aproximación a la viscosidad requerida, mediante el uso de un modelo predictivo?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo predictivo para la viscosidad de crudo codiluido usando análisis multivariable de los análisis obtenidos en el laboratorio de las naftas, fondos y crudo que los constituyen.

1.2 Objetivo específico

- Identificar la variable predictora que más afecta el cambio en la respuesta (viscosidad).
- Determinar la mínima cantidad de nafta para alcanzar la especificación de venta del crudo codiluido castilla norte.

2. Marco conceptual

El proceso de refinación es el conjunto de operaciones unitarias para la transformación del petróleo crudo en productos valiosos.

Las modificaciones en masa, composición química y mezclas de diferentes matrices obtenidas de subprocesos se destilan o se separan para hacerlos más útiles, en estos procesos es común encontrar el rediseño de sistemas de calentamiento, mezclado, enfriamiento, aumento o disminución de presión, e incluso ocurren reacciones químicas que conducen a compuestos de mayor valor.

Es así como, en los diferentes procesos en una refinería siempre está presente la evaluación de su eficiencia y la optimización de los recursos, revisando cada uno de los diferentes procesos de forma particular y grupal para tomar decisiones que mejoren las técnicas y redunden en resultados que agreguen valor y aporten al margen de refinación (González Lizcano A. N, 2018) .

Por lo tanto, es de suma importancia para la refinería buscar la mejora en sus procesos que permitan aumentar el margen de refinación y a su vez le generen competitividad en un exigente mercado internacional, cuya tendencia es a refinar crudos pesados, lo cual marca la pauta a implementar, con los hidrocarburos, diferentes tipos de mezclas que hagan viable su comercialización, pero que a su vez antepone retos en la planeación y prevención dentro de la organización, en cuanto al comportamiento físico y químico; antes, durante y después de la preparación dichas mezclas ya que podrían generar problemáticas asociadas a calidad y estabilidad del producto final.

Luego de proponer varias alternativas con modelos que presentan de viscosidad Nathalia Azucena y sus compañeros concluyen que: El modelo que entrega un crudo con mejor calidad API

es el que se mezcla con GLP y crudo liviano proveniente del Piedemonte llanero (Pauto y Floreña) con 16,7° API que corresponde a la opción 3. (Guerrero Espinoza C. R, 2017)

Debido a que las diferentes problemáticas de calidad en el mezclado están directamente relacionadas con los comportamientos fisicoquímicos y composición de los hidrocarburos base de mezcla, es necesario anticipar condiciones que viabilicen el cumplimiento de parámetros de especificación para venta y transporte.

La refinería de GRB, ha venido implementando procesos asociados con la mejora de calidad en viscosidad adicionando GLP al crudo despachado, cuya preparación consiste en dosificar GLP teniendo como base la viscosidad inicial del fluido en línea y su contenido de nafta agregada en el proceso de producción, con el fin de alcanzar la viscosidad exigida en el sistema de transporte por oleoducto en su preparación.

Desde una óptica operacional, la calidad es fundamental al contemplar que las mezclas de hidrocarburos y las matrices de los productos de proceso cambian, proporcionalmente según la dieta cargada a la refinería, careciendo esta de evaluaciones técnicas que permitan conocer de antemano, el impacto de los diferentes cambios en la calidad del producto final, asociados al proceso de mezclado y dilución para entrega del producto final. Es así como, es importante disponer de un método preventivo y predictivo a nivel de laboratorio para minimizar el impacto generado por la variación de la viscosidad (por fuera de rangos de operación) en el crudo codiluido.

2.1 Componentes de la mezcla del crudo codiluido

2.1.1 Fondos de vacío

El petróleo crudo es una mezcla compleja y compuesta de una gran cantidad de hidrocarburos.

La refinación de crudo comienza en una torre de destilación al vacío, donde es calentado a temperaturas entre 350°C a 380°C, donde se busca la separación de cada una de sus fracciones, empezando a volatizar los compuestos más livianos hasta quedar el más pesado en el fondo de la torre de destilación, a este último se le conoce como fondos de vacío. ECOPETROL S.A cuenta con varias unidades de destilación entre ellas la U-2000, de donde provienen los fondos de vacío, un porcentaje de ellos son direccionados para la preparación del crudo codiluido, la otra parte va para la producción de asfalto, o combustóleo pesado. De la U-2000, el 30% de los fondos van dirigidos a la preparación de asfalto, ese porcentaje de fondo se mezcla con fondos de las unidades U-253, U-200, y U-2100, para obtener un asfalto con una penetración de 30 a 90 centipoise en especificación, luego es mezclado con fondos del tanque 205, para obtener una penetración de 60 a 70 centipoise para ventas. El 70 % restante del fondo es dirigido a la preparación del crudo codiluido, en su preparación se hace necesario agregar un volumen de nafta virgen proveniente de la misma U-2000 de topping, un porcentaje de crudo reducido y un crudo base (k964), todo para lograr tener una viscosidad en la mezcla entre 400 cSt – a 600 cSt

2.1.2 Crudo reducido

En las plantas de crudo existe una torre atmosférica y otra torre de vacío, en la primera ingresa la carga(crudo) a la refinería, son crudos que llegan de los campos, en esta primera torre se realiza una destilación de productos blancos(ACPM, JET,NAFTAS); los cuales son casi un 50% del volumen de la carga que ingresa; el otro 50% en volumen queda en el fondo de la torre, a este se le conoce como crudo reducido, es una muestra bituminosa que aun contiene gasóleos.

2.1.3 Nafta virgen

Es una mezcla de hidrocarburos livianos producto de la destilación a presión reducida, se usa en la preparación de gasolina regular, o en ocasiones como diluyente en la preparación de crudo codiluido. la producción de nafta virgen que sale del proceso de la destilación atmosférica de la carga a la unidad 2000 de topping, una pequeña fracción (entre el 15% a 20%), es direccionada hacia la preparación de crudo codiluido, lo restante es enviado para la preparación de gasolina regular.

2.1.4 Crudo base k964

Es un crudo almacenado en el tanque de k-964, es usado para la preparación del crudo codiluido, como corrector de la viscosidad en la preparación, y agregado después del mezclado entre el fondo y la nafta virgen.

2.1.5 Tanques de almacenamiento para ventas K-965, y K-966.

Son los tanques de almacenamiento del crudo codiluido, con una capacidad de almacenamiento de 185.000 barriles, su tiempo estimado para llenado es de 24 horas, la mezcla debe llegar con una temperatura no mayor a 140 °F, por especificaciones del tanque.

3. Estado del arte

Debido a la gran cantidad de crudos pesados que recibe la refinería de Barrancabermeja, y que para sus inicios habían altos volúmenes de combustóleo, eso llevaba a utilizar mayor consumo de diluyentes, esto a su vez llevaba a deprimir el margen de ganancias en la refinería. Por ejemplo, para el año 2014 las dietas cargas a la operación generaban al día una producción cercana de 18000 barriles de fondo, y por falta de infraestructura generaban un gran almacenamiento en stock, convirtiéndose este en un problema para operaciones y toda la cadena logística. Sumado a esto los precios bajos del fondo, lleva a buscar una nueva alternativa que permitiera la evacuación de fondos, buscando un mejor margen de ganancias y a su vez la evacuación de éstos.

Dado lo todo lo anterior, esto llevó a buscar una nueva iniciativa que consiste en la oportunidad de disponer de los fondos, alrededor del año 2014, donde se realizan estudios que fueron realizados en el laboratorio de la refinería de Barrancabermeja. En los estudios se caracterizaron los componentes de los fondos por medio de las metodologías empleadas para densidad, API, comportamiento reológico, y evaluación de cada componente individual de acuerdo con la compatibilidad para determinar orden de adición y proporciones permitidas.

Este informe se evalúa las corrientes de crudo ELC, LCT, crudo Reducido de U200, Nafta pre-flash de la Torre 2005, fondo de vacío de la Torre 2003 y crudo Magdalena blend del TK961 como componentes para crudo sintético "YUMA 1", Se realizaron en total 17 mezclas, y como todas se habían realizado teniendo en cuenta las proporciones teóricamente compatibles, se escogieron tan solo 10 para su caracterización teniendo en cuenta en este paso solo los parámetros de calidad para transporte. (Valenzuela A. A, 2015). Después de realizar varios ensayos se determina que la máxima de mezcla para de nafta vs Magdalena medio, para que sea compatibles

es de 11,47% de crudo magdalena Vs 88,53% de nafta. Para la mezcla de Nafta vs crudo LCT, La relación máxima de mezcla para que sea compatible es de 14,06% de crudo ELC-LCT Vs 85,94% de nafta. Que para los componentes (Crudo Magdalena, Crudo ELC LCT y Crudo Reducido), se observó que en cualquier relación no se cruzan el índice de solubilidad con el de insolubilidad. (Valenzuela A. A, 2015).

Es de suma importancia conocer de antemano la caracterización de los crudos de carga a las unidades de destilación primaria en la refinería de Barrancabermeja, en especial la U-2000 de topping, que direcciona el 80% de los fondos de vacío y el 20% de nafta liviana hacia la preparación del crudo codiluido Castilla norte.

El buen resultado del producto final depende de la dosificación de nafta que se requiere en la mezcla para cumplir con la especificación de viscosidad, y que no impacte en el consumo excesivo de la nafta por su alto costo comercial a la empresa, ya que este producto también es empleado en la preparación gasolinas. En efecto, La nafta deja un margen de rentabilidad alto dependiendo al direccionamiento que se le dé; por ejemplo, para la preparación de gasolinas vs diluyente, donde su valor económico es apreciablemente más bajo.

En el estudio realizado por García et al. (2010), que trata de la optimización del transporte por oleoductos de crudo pesado Castilla, se implementó un esquema de transporte por oleoducto diluyendo los crudos pesados con naftas. Como resultado logró incrementar la producción de crudo Castilla de 40 a 75 mil barriles de petróleo por día (KBPD) en un lapso de 5 años. El objetivo de este trabajo fue el de predecir, usando ecuaciones básicas de flujo de fluidos, la cantidad mínima de nafta que permitiera fluir el crudo pesado sin incurrir en costos adicionales asociados con la nafta diluyente. García et al. concluyen que la viscosidad óptima para la mezcla de crudo Castilla y Nafta estaba alrededor de 300 cS a 30°C (García C.A, 2010)

La alta viscosidad de los crudos, las grandes distancias entre los campos de producción y los sitios de aprovechamiento (refinerías y puertos de exportación) y la necesidad de asegurar la calidad de crudos livianos como el de Cusiana, que se transportan por la misma red de oleoductos, plantearon retos tecnológicos importantes que exigieron de acciones innovativas (García C.A, 2010). Es así que García et al. (2010) usaron la ecuación de Refutas (Ec. 1, 3, 3) para calcular el índice de viscosidad. Con base en dicho modelo, se lograron predecir las viscosidades de mezclas de hidrocarburos con una alta precisión, comparadas con las obtenidas por métodos de ensayo tradicionales como el ASTM-D3411; en promedio las desviaciones porcentuales fueron del 2% en intervalos de temperatura que variaron entre 20 - 100°C. Además, el modelo predictivo permitió calcular el porcentaje de nafta a adicionar para transportar el crudo por los oleoductos manteniendo el margen de viscosidad permitido.

Cálculo de la viscosidad de mezcla de hidrocarburos

$$VBN_i = 10,975 + 14,535 \cdot \ln[\ln(\mu_M; c_s + 0,8)] \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde el VBN_i y la viscosidad de la mezcla están definidos como:

$$VBN_M = \sum(VBN_i) \cdot W_i \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\mu_M = \text{EXP}[\text{EXP}[VBN_M - 10,975/14,534]] - 0,8 \quad (\text{Ec. 3})$$

W es la fracción másica de los componentes de la mezcla.

El un trabajo propuesto por Ramona Díaz y colaboradores, logran predecir las viscosidades de una mezcla de aceites, usando un método simple de predicción de viscosidad lograron predicción de la viscosidad con errores absolutos relativos promedio de 10 %, teniendo como referencia temperaturas entre 20°C y 100°C, (Díaz R. M, 1995)

También se pueden usar métodos empíricos para predecir la viscosidad (Perez Mares A. E, 2017). por ejemplo, Angel Eduardo Pérez Mares, propone ecuaciones de predicion de viscosidad de hidrocarburos basadas en la sumatoria de las fracciones volumétricas y las propiedades de los hidrocarburos puros, lo que significa que están limitadas para mezclas entre dos o más hidrocarburos (Ec. 4) en el que se incluyen la fracción molar, peso, y volumen, para predecir la viscosidad.

Métodos de predicción de la viscosidad de mezclas

$$\mu_m \sum_{i=1}^n X_i f(\mu_i)$$

$$\vartheta_m \sum_{i=1}^n X_i f(\vartheta_i) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde : X_i = Fracción del volumen

μ_i = Viscosidad cinemática

ϑ_m = Viscosidad dinámica

Por su parte (Perez Mares A. E, 2017), demostró que también es posible predecir la viscosidad de una mezcla usando el modelo matemático de Shu (Ec. 5), los resultados obtenidos concluyeron que el modelo matemático de Shu predice la viscosidad de la mezcla del crudo pesado con crudo ligero, con errores menores del 5%, comparado con los datos medidos de laboratorio. (Perez Mares A. E, 2017)

Modelo matemático para el cálculo de viscosidad de las mezclas de Shu

$$\ln \mu_m = \left(\frac{\alpha V_p}{\alpha V_p + V_L} \right) \log \mu_p + \left(1 - \frac{\alpha V_p}{\alpha V_p + V_L} \right) \log \mu_L \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\alpha = 17,04((\rho_p - \rho_L)^{0.5237} \rho_p^{3.2745} \rho_L^{1.6316}) / \ln\left(\frac{\mu_p}{\mu_L}\right)$$

Donde:

μ_m = Viscosidad de la muestra

μ_p = Viscosidad del crudo pesado

μ_L = Viscosidad del crudo ligero

V_p = Fracción volumétrica del crudo pesado

V_L = Fracción volumétrica del crudo ligero

ρ_p = Densidad relativa del crudo pesado

ρ_L = Densidad relativa del crudo ligero

α = Constante empírica del modelo de Shu

Aunque existe una gran cantidad de ecuaciones para correlacionar la viscosidad en mezclas de hidrocarburos (Tabla 1), a la hora de seleccionar alguna de ellas se debe determinar cual de ellas es la que tiene el menor porcentaje de error con respecto a la viscosidad esperada y mayor flexibilidad con el rango de condiciones en la que se prevé implementar el modelo (Perez Mares A. E, 2017)

Tabla 1.

Métodos más comunes para la predicción de mezclas

Método	Año de publicación	Modelo	Parámetros o anotaciones
Arrhenius	1887	$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^n X_i \ln \mu_i$	
Bingham	1906	$\mu_m^{-1} = \sum_{i=1}^n V_i \mu_{mi}^{-1}$	
Kendall And Monroe	1917	$\mu_m = \left(\sum_{i=1}^n X_i \mu_i^{1/3} \right)^3$	
Cragoe	1933	$I_{cr} = \sum_{i=1}^n W_i I_{cr_i}$ $I_{cr_i} = \frac{a \ln(b)}{\ln\left(\frac{\mu_i}{c}\right)}$	a = 1000 b = 20 c = 0,0005
Refutas Blend Index	1947	$I_R = \sum_{i=1}^n W_i I_{R_i}$ $I_R = a * \ln \ln(V_i + b) + c$	a = 14,534 b = 0,8 c = 10,975
Maxwell Blend Index	1950	$I_M = \sum_{i=1}^n V_i I_{R_i}$ $I_M = a * \ln \ln(V_i + b) + c$	a = -21,8373 b = 0,8 c = 59, 58959
Chevron (I)	1971	$I_{C(1)_i} = \sum_{i=1}^n V_i I_{C(1)_i}$ $I_{C(1)_i} = \sum_{i=1}^n V_i \left(\frac{a + b \ln V_i + c (\ln V_i)^2}{1 + d \ln V_i + e (\ln V_i)^2} \right)$	a = 0,1749 b = 0,2681 c = 0,0261 d = 0,4027 e = 0,0164
Chevron (II)	1971	$I_{C(2)} = \sum_{i=1}^n V_i I_{C(2)_i}$ $I_{C(2)_i} = \frac{\ln(V_i)}{\ln(a * V_i)}$	a = 1000
Shu	1984	$\ln \mu_m = \left(\frac{\alpha V_p}{\alpha V_p + V_i} \right) \log \mu_p + \left(1 - \frac{\alpha V_p}{\alpha V_p + V_i} \right) \log \mu_L$ $\alpha = \frac{17.04 ((\rho_p - \rho_L)^{0.5237} \rho_p^{3.2745} \rho_L^{1.6316})}{\ln\left(\frac{\mu_p}{\mu_L}\right)}$	Mezclas Binarias a = 17,04 b = 0,5237 c = 3,2745 d = 1,6316 $\rho_1 > \rho_2$
Wallace & Henry	1987	$I_{WH} = \sum_{i=1}^n W_i I_{WH}$ $I_{WH} = \frac{1}{\ln\left(\frac{\mu_i}{a}\right)}$	a = 0,01

Wallace & Henry	1987	$I_{WH} = \sum_{i=1}^n W_i I_{WH}$ $I_{WH} = \frac{1}{\ln\left(\frac{\mu_i}{a}\right)}$	a = 0,01
Barrufet & Setiadarma	2003	$\ln \mu_m = k_1 \ln \mu_1 + k_2 \ln \mu_2$ $k_1 = \frac{a V_1}{a V_1 + V_2} \quad k_2 = 1 - k_1$ $a = a x_2^b$	Mezclas Binarias a = 0,35242695 b = 0,71154 x2 = Fracción molar del componente más liviano
Prakash	2003	$I_p = \sum_{i=1}^n v_i I_{p_i}$ $I_{p_i} = a * \ln(V_i + b) + c$	a = 376,38 b = 0,93425 c = -157,43

Con μ_i = viscosidad del componente i , μ_m = viscosidad de la mezcla , X_i = fracción molar del componente i , V_i = volumen del componente i , $I_{Cr}, I_{R}, I_{M}, I_{C}, I_{WH}, I_{P}$, = índices de Cragoe, Refutas, Maxwell, Chevron, Wallace-Henry y Parkash, respectivamente. (Perez Mares A. E, 2017)

Con base en el panorama expuesto en los párrafos anteriores, este proyecto busca ajustar, mediante un estudio de análisis multivariable, un modelo predictivo que permita al operador de blending en casa bombas ocho, predecir la viscosidad del crudo diluido usando el uso del software The Unscrambler.

4. Metodología

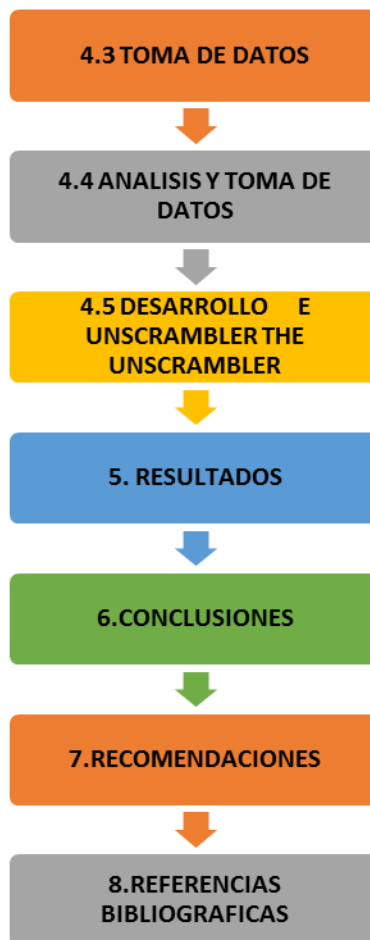
Para lograr el cumplimiento de los objetivos se hace:

1. Contacto con personal de la casa bombas ocho para la indagación y recolección de información del proceso.
2. Luego contactar a la persona de la U-2000 de topping para la indagación y recolección de información del proceso, así mismo solicitar la información de la base de datos PI (sistema de información en plantas).
3. Posteriormente solicitar a laboratorio permiso para adquirir acceso de la información a la base de datos Labvantage (sistema de información en laboratorio).
4. Teniendo la información requerida se procede a realizar un análisis de la información obtenida, y se procede a la tabulación de los datos.
5. Se hace uso del software The Unscrambler versión 11.0 (64bit) para realizar el estudio de análisis multivariable, así mismo la modelación y validación del modelo ajustado.

4.1 Diagrama de flujo

Figura 1.

Diagrama de flujo



4.2 Análisis que se realizan en el laboratorio

4.2.1 Viscosidad cinemática

Muchos de los productos de acuerdo a su viscosidad muestran una condición diferente en sus propiedades física , y su especificación para su debido tratamiento en el proceso. La viscosidad cinemática se realiza siguiendo la norma de la ASTM D 445 (método de prueba estándar para la

determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad)), que especifica un procedimiento para la determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos, el resultado obtenido a partir de este método de prueba depende del comportamiento de la muestra.

4.2.2 Viscosidad de asfaltos

Se usa la norma ASTM D 4402, (método de ensayo estandar para determinar la viscosidad de asfaltos a temperaturas elevadas usando un viscosímetro rotacional).

Esta norma describe la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte, es decir el coeficiente de viscosidad. Este coeficiente es una medida de la resistencia al flujo de un líquido, comúnmente llamado viscosidad. Al hablar de viscosidad aparece recurrentemente el término líquido newtoniano, el cual es un líquido para el cual la velocidad de corte es proporcional al esfuerzo de corte. La relación constante entre el esfuerzo corte y la velocidad de corte es la viscosidad del líquido. La viscosidad de un líquido no Newtoniano no depende de la velocidad de corte. Si la relación no es constante, el líquido es no Newtoniano. Muchos líquidos muestran comportamiento Newtoniano o no Newtoniano dependiendo de la velocidad de corte, la temperatura o ambas, norma ASTM D 4402 (a través de esta prueba se puede determinar la viscosidad de la mezcla final del crudo codiluido).

4.2.3 Penetración

Se realiza siguiendo la norma ASTM D5, Se usa como una medida de consistencia, Altos valores de penetración indican una consistencia blanda. norma ASTM D5 (instructivo de operación para la ejecución del método de ensayo estándar para penetración de materiales bituminosos).

4.2.4 Densidad y gravedad API

El ensayo se realiza siguiendo la norma ASTM D5002 (método de ensayo estándar para la densidad, densidad relativa y gravedad API de crudos por medio del densímetro digital) . norma ASTM D5002.

4.3 Toma de datos

El estudio realizado toma como base de partida los datos almacenados en el sistema de información Labvantage, sistema que guarda los resultados de los análisis realizados en el laboratorio, posteriormente se realiza un análisis y depuración de la base de datos con el fin de realizar un filtro, dejando solo aquellos análisis que se encuentran con toda la analítica completa. Se toman los resultados de los análisis realizados a las muestras que componen la mezcla del crudo codiluido, (el fondo de vacío, naftas, crudo, y crudo base), otra parte de la información de la base de datos provienen del sistema PI (SITEMA DE INFORMACION), en plantas.

En los datos obtenidos de plantas se cuenta con un historial del comportamiento de la viscosidad del sensor ubicado un poco antes del ingreso de la mezcla del crudo codiluido a los tanques de almacenamiento k-965 yk-966.

4.4 Analisis y numeración de datos

La data obtenida por el sistema PI (SITEMA DE INFORMACION) de plantas, para el caso del sensor, registra datos de la viscosidad cada hora, lo que implicaba un gran número de datos para cada día, de proceso. Por lo anterior se procede a sacar un promedio de la viscosidad del tanque por día. También se aplicó el mismo procedimiento para fijar la composición de cada uno de los componentes de la mezcla del crudo codiluido. Con estos ajustes de obtuvo una data de información de año y medio como soporte para el estudio del proyecto. Se muestra el orden por columnas ver (figura 2)

Figura 2.

Tabla base de datos (análisis de datos)

	FONDO	NAFTA	CRUDO	K964	VIS	LOGVIS
	1	2	3	4	5	6
1	0,2287	0,0651	0,1984	0,5078	480,7859	2,6820
2	0,2364	0,0662	0,1798	0,5176	519,8798	2,7159
3	0,2228	0,0658	0,1967	0,5147	471,0350	2,6731
4	0,2193	0,0642	0,2142	0,5022	479,2890	2,6806
5	0,2548	0,0655	0,1675	0,5123	476,1248	2,6777
6	0,2545	0,0628	0,1920	0,4907	479,4632	2,6808
7	0,2506	0,0648	0,1776	0,5071	502,9646	2,7015

4.5 Desarrollo

Se pobla una base de datos de cuatro columnas correspondientes a los componentes de mezcla (Fondo,Nafta, Crudo, y k964), se toma un historial de año y medio de análisis, conociendo la viscosidad de cada uno de ellos. Luego de organizar la información se realiza un estudio de

correlaciones, entre variables de cada componente, con el fin de observar la relación que podría existir entre ellas.

Se toman todas las propiedades y se evalúan por pares todas las posibles intreracciones. Adicionalmente, los datos fueron tratados usando diagramas de cajas y bigotes, con el fin de determinar si existían mediciones que estuvieran por fuera de la tendencia del promedio de los datos tomados.

Después del análisis exploratorio, se realizó un análisis de componentes principales (PCA). Es un método estadístico que permite manejar un gran número de muestras, simplificándola de tal manera que busca extraer información a partir de subgrupos, aportados por las variables iniciales. Se cuenta con un grupo de variables principales a las cuales se les tiene asociado un conjunto de observaciones, con el único fin de obtener una serie de predicciones sobre una variable de respuesta, en este caso la viscosidad (Rodrigo J. At, 2017).

Para el análisis del PCA, se tienen en cuenta las viscosidades de fondo, nafta, crudo, k964 que son ingresadas por columnas, y el logaritmo en base diez de la viscosidad; con eso se hace un pretratamiento a la magnitud de los datos, se usa para asemejar la información; además, eso permite linealizar la viscosidad, teniendo en cuenta que esta tiene un comportamiento logarítmico.

4.6 Ajuste a los parámetros del modelo predictivo

En esta parte del estudio se procede a ajustar un modelo, para determinar si es posible inferir la viscosidad usando la composición de la mezcla, se escoge el algoritmo Kennard Stone. El método Kennard Stone selecciona un subconjunto de muestras que proporcionan una cobertura uniforme sobre el conjunto de datos e incluye muestras en el límite del conjunto de datos. El

método comienza por encontrar las dos muestras que están más alejadas utilizando la distancia geométrica. Para agregar otra muestra al conjunto de selección, el algoritmo selecciona de las muestras restantes, aquella que tiene la mayor distancia de separación de las muestras seleccionadas. La distancia de separación de una muestra candidata del conjunto seleccionado es la distancia del candidato a su muestra seleccionada más cercana. Esta muestra más separada se agrega luego al conjunto de selección y el proceso se repite hasta que se agrega el número requerido de muestras, k , al conjunto de selección (Stone R. W. Kennard & L. A., 2013).

Se selecciona como modelo regresión por mínimos cuadrados parciales. La regresión de mínimos cuadrados parciales es una técnica que reduce los predictores aun conjunto más pequeños de componentes no correlacionados y realiza una regresión sobre estos componentes en lugar de tomar los datos principales (Bjørn-Helge M., 2022)

Luego se realiza una validación cruzada; en la validación cruzada de K iteraciones o K -fold cross-validation, los datos de muestra se dividen en K subconjuntos. Uno de los subconjuntos se utiliza como datos de prueba y el resto ($K-1$) como datos de entrenamiento (Payam R. E, 2008).

Tomando un 70% de las muestras, partiendo de una base de 316 muestras, para hacerla de manera aleatoria, pero ordenada a la vez y utilizando la metodología de Kennard Stone; se tomaron 220 muestras, que son aproximadamente el 70% de las muestras, para la calibración del modelo, el algoritmo escoge las más dispersas, con eso garantiza que se obtiene una mezcla representativa de todo el universo de datos.

El proceso de validación cruzada es un ciclo de k iteraciones, con cada uno de los posibles subconjuntos de datos de prueba. Finalmente se calculó la media aritmética de los resultados de cada iteración para obtener un único resultado. Este método es muy preciso puesto que se evalúa a partir de K combinaciones de datos de entrenamiento y de prueba (Payam R. E, 2008).

En el software The UNSCRAMBLER, el proceso inicia tomando diecinueve segmentos y dejando uno para la validación interna, sin incluir el 30% de las muestras seleccionadas para la validación del modelo final; el ciclo se repite veinte veces, variando siempre un segmento para su validación interna.

4.7 Validación del modelo

Para la creación y calibración del modelo se toman solamente el 70% de los datos obtenidos. La validación se trabajó utilizando el 30 % de los datos restantes, comparando los resultados obtenidos vs a los que ya se conocen, evaluando el error cuadrado entre los valores predichos y los experimentales.

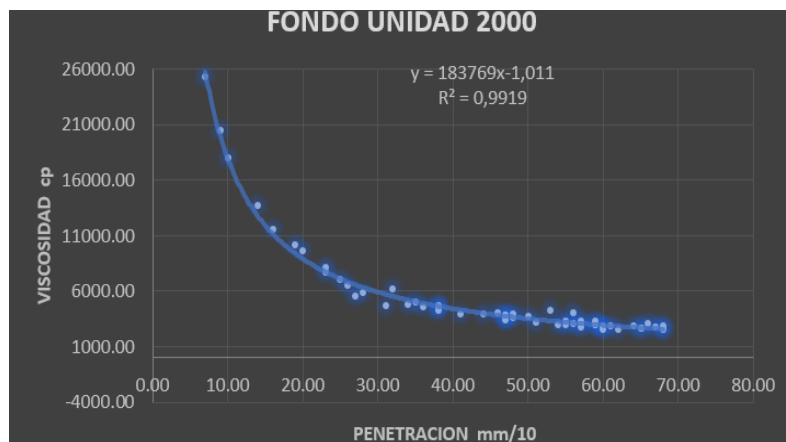
Luego se observan los resultados del error cuadrático medio (RMSE). También llamado error de raíz cuadrada media (RMSE). El error cuadrático promedio proporciona el promedio de la diferencia cuadrática entre la predicción del modelo y el valor de destino. Se puede utilizar como medida de la calidad de un estimador (IBM, 2021).

5. Resultados

Como parte de los resultados para el caso del fondo de vacío se tiene una curva de viscosidad vs penetración, con el fin de observar si existe o no una relación entre las dos variables del componente, en este caso para el fondo de vacío, se observa que el R, obtenido indica una muy buena relación entre las dos variables.

Figura 3.

Gráfico comparativo entre viscosidad y penetración de fondos U -2000



Para el caso de la nafta se observa que tiene una correlación de influencia negativa lo que indica que entre más nafta (ver figura 12) menos viscosidad, y a menos nafta mayor viscosidad.

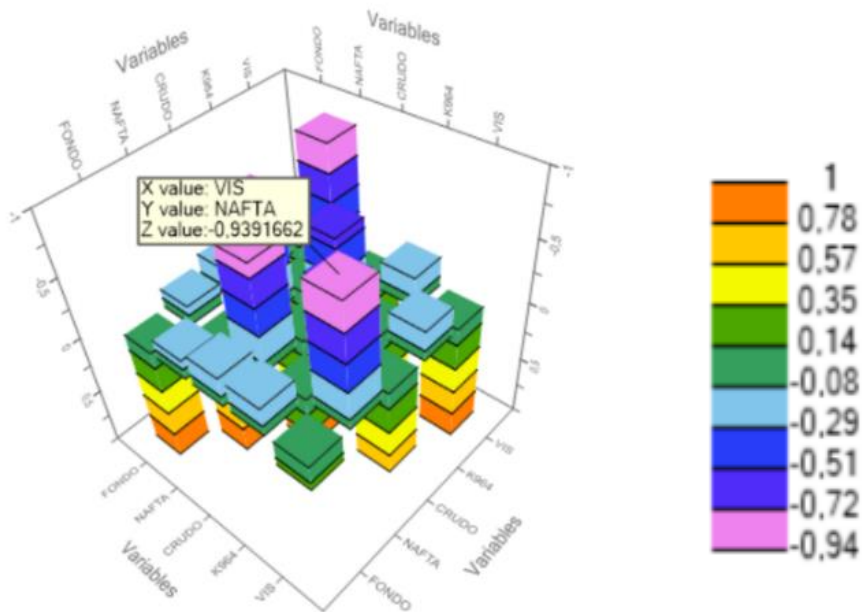
Figura 4.

Correlación de variables (análisis de variables)

Variable C...		FONDO	NAFTA	CRUDO	K964	VIS
		1	2	3	4	5
FONDO	1	1	-0,1527	-0,2281	-0,2201	0,2022
NAFTA	2	-0,1527	1	-0,833	0,3061	-0,9392
CRUDO	3	-0,2281	-0,833	1	-0,5853	0,7313
K964	4	-0,2201	0,3061	-0,5853	1	-0,2318
VIS	5	0,2022	-0,9392	0,7313	-0,2318	1

Figura 5.

Gráfico de tendencias



En este gráfico de tendencia se muestra con colores la tendencia según la pendiente.

Por ejemplo, color naranja indica que cuando una variable aumenta y la otra también aumenta existe una tendencia positiva. Para el caso del color rosado (ver figura 5) cuando la

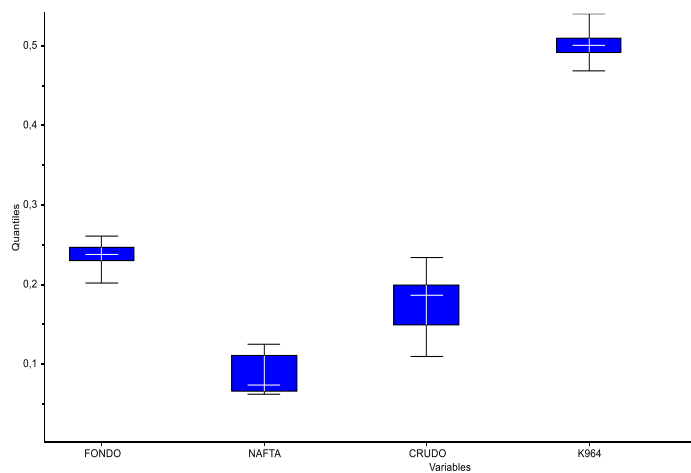
variable aumenta y la otra disminuye, se tiene una tendencia negativa. El caso de la nafta muestra de una forma gráfica la tendencia negativa lo que significa que realmente impacta fuertemente en la viscosidad, a mayor nafta menos viscosidad. El mismo comportamiento se observa (ver figura 4), en donde para todos los casos existe una correlación negativa entre el contenido de nafta, las fracciones volumétricas de las otras fracciones y la viscosidad.

Se observa en el diagrama de cajas y bigotes una diferencia en tamaño para las fracciones de crudo y nafta, lo cual indica que hay una mayor variabilidad de estas fracciones en el tiempo (ver figura 10). Mientras que los fondos y k964 se mantienen estables y no hay mucha variabilidad con respecto al tiempo.

En esta clase de gráficos lo que se quiere es tener una idea de la distribución de los puntos (dispersión), la simetría, que tan alejados están los valores mínimos y máximos de la distribución, en caso de encontrarse valores atípicos estos valores se reflejaran por fuera de los mínimos o máximos de la distribución del diagrama, en los bigotes.

Figura 6.

Diagrama de cajas y bigotes



Cuando se tiene la media de cada componente (ver figura 7), se observa que tanto se esta consumiendo de este en la mezcla, también muestra en porcentaje, entendiéndose el consumo en volumen, y el rango de distribución que se ha estado manejando en el tiempo durante el proceso de cada uno de ellos.

Figura 7.

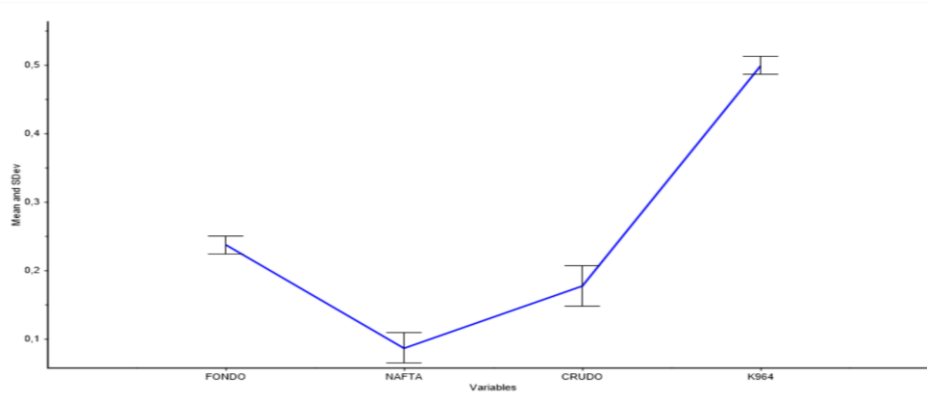
Rangos de distribución de los componentes

Statistics		FONDO	NAFTA	CRUDO	K964
		1	2	3	4
Max	1	0,2603	0,1245	0,2338	0,5390
Min	2	0,2009	0,0618	0,1092	0,4673
Median	3	0,2378	0,0741	0,1863	0,4994
Q1	4	0,2291	0,0655	0,1494	0,4903
Q3	5	0,2459	0,1112	0,1984	0,5080

La línea azul (ver gráfico 8) muestra la media de la fracción volumétrica típicamente empleada en las operaciones de blending, para cada punto de los componentes de la mezcla (de izquierda a derecha: fondo, nafta, crudo y k964), mientras que las barras negras indican la desviación estándar.

Figura 8.

Gráfico de la media y desviación estándar



En los valores de medición de la media se aprecia que muestra el consumo en porcentaje del componente que más se uso en la preparación(ver figura 9), es decir que el k964 se gasta mas e incluso con valores superiores a los de la fracción del fondo, lo que significa que posiblemente el k964 se está usado como diluyente en mayor cantidad.

Figura 9.

Valores de la media y desviación estándar

Statistics		FONDO	NAFTA
Statistics		Mean	Std Deviation
		1	2
FONDO	1	0,2369	0,0131
NAFTA	2	0,0865	0,0225
CRUDO	3	0,1773	0,0295
K964	4	0,4993	0,0132

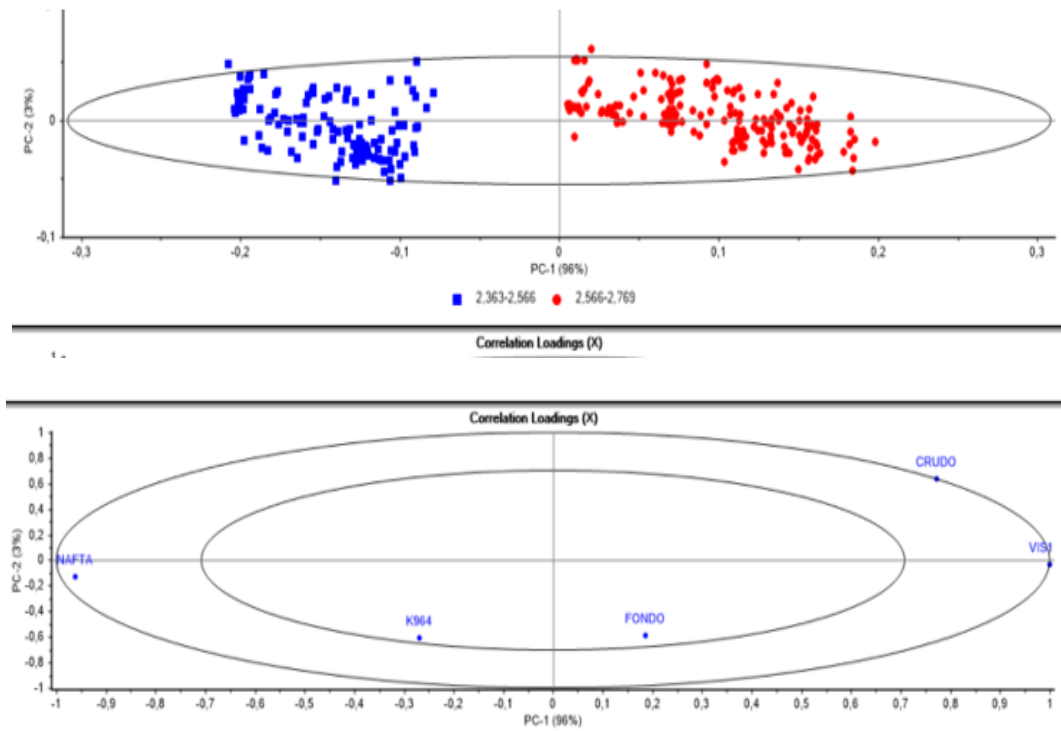
Analizando la figura 10 (análisis PCA), se puede inferir que cuando la variable se ubica a la derecha de la elipse quiere decir que esas cargas afectan positivamente a la variable de respuesta,

si está a la izquierda afectan negativamente. Ahora si se agrupan las muestras por viscosidad, la viscosidad tiende a aumentar hacia la derecha de la elipse, (ver figura 10) con un valor de 2,566 a 2,796 cubre el 96 % de los datos con alta viscosidad, a su vez la misma figura indica que las viscosidades más bajas están a su izquierda, con un valor de 2,363 a 2,566.

En la segunda elipse (figura 10), en la parte baja de la gráfica se observa que la muestra de nafta tiene una tendencia opuesta opuesta a la viscosidad (color azul), lo que se puede interpretar fácilmente que a mayor nafta menor viscosidad, en conclusión, se ve que la viscosidad aumenta de izquierda a derecha (ver figura 10)

Figura 10.

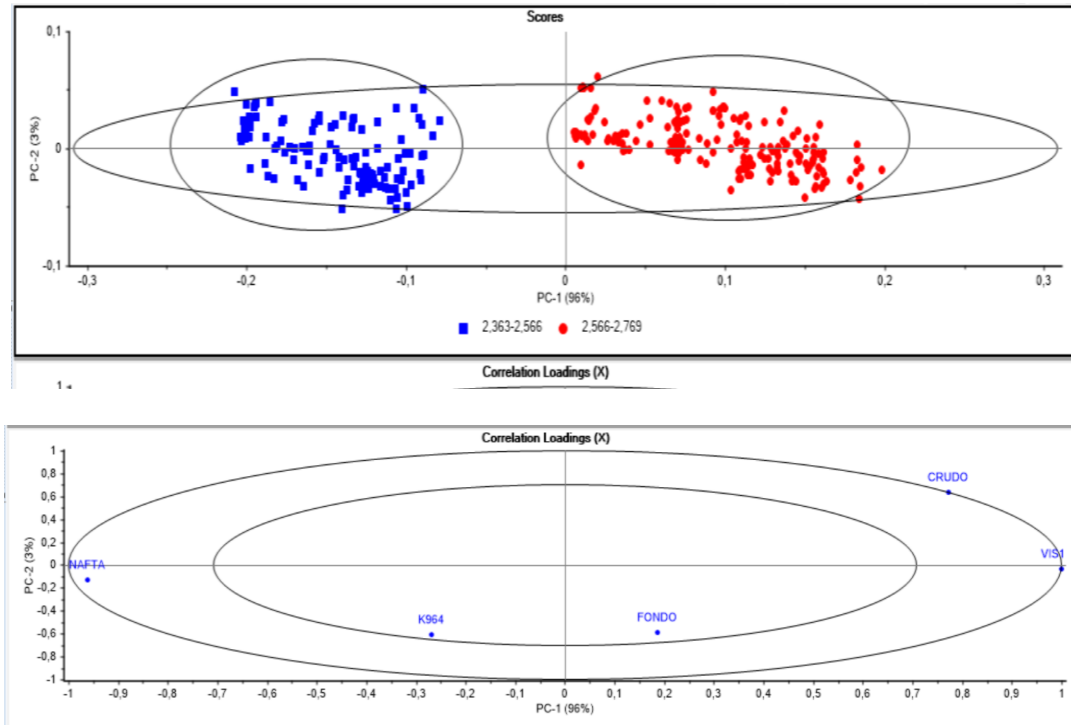
Tendencia de la mezcla con respecto a la viscosidad



Se observa dos tendencias de puntos de preparación donde la viscosidad en un tiempo estuvo baja (color azul) y en otro tiempo la viscosidad estuvo alta (color rojo) (ver figura 11)

Figura 11.

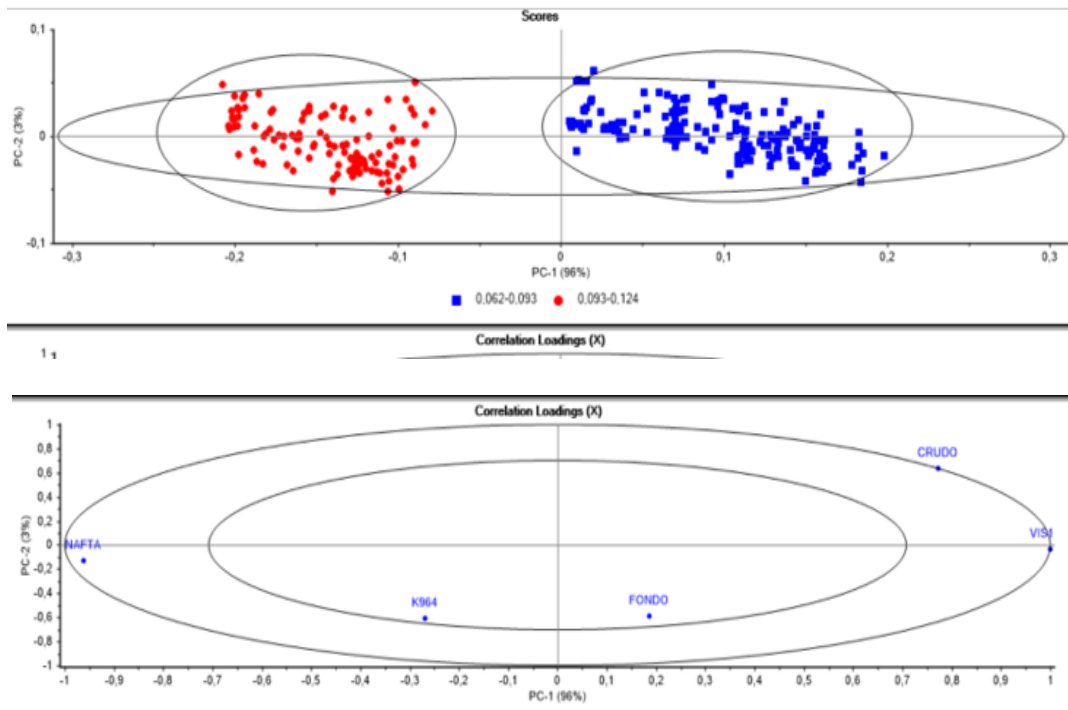
Viscosidad Baja y alta



Con respecto a la la nafta se observa en color rojo los puntos que tienen mayor nafta en la mezcla al lado izquierdo (ver grafica 12) con valores de 0,093 a 0,124 y a su lado derecho los puntos que tienen menor consumo de nafta.

Figura 12.

Tendencia de la mezcla con respecto a la nafta

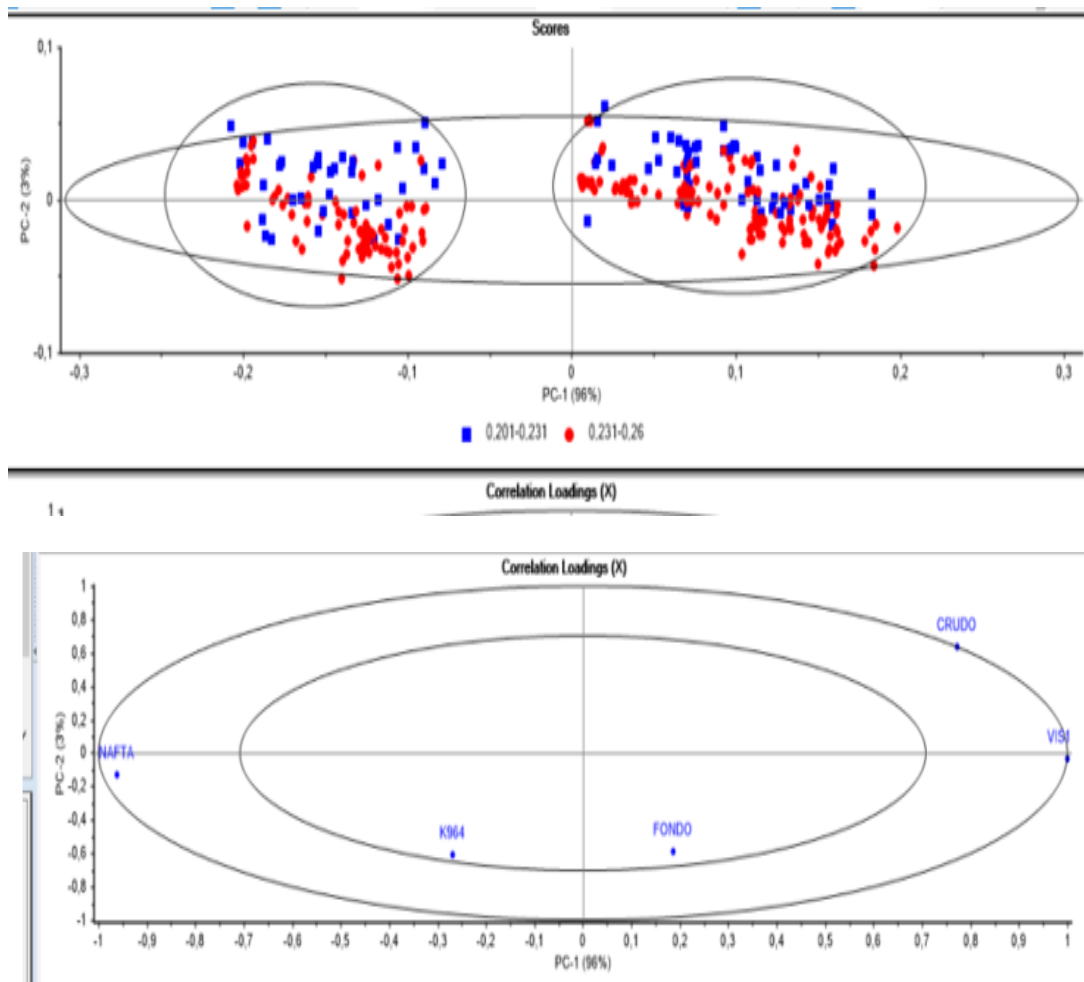


Con respecto al fondo (color rojo), el comportamiento es diferente a los anteriores casos; no va de izquierda a derecha, en este caso el fondo va de abajo hacia arriba en los dos grupos. La mayoría está en la parte baja y cuando empieza a disminuir está arriba, no se nota mucho, porque tal vez no es la variable decisiva (ver grafica 13).

Con valores de 0,231 a 0,26 para el primer grupo y para el segundo grupo de de 0,201 a 0,231

Figura 13.

Tendencia de la mezcla con respecto al fondo

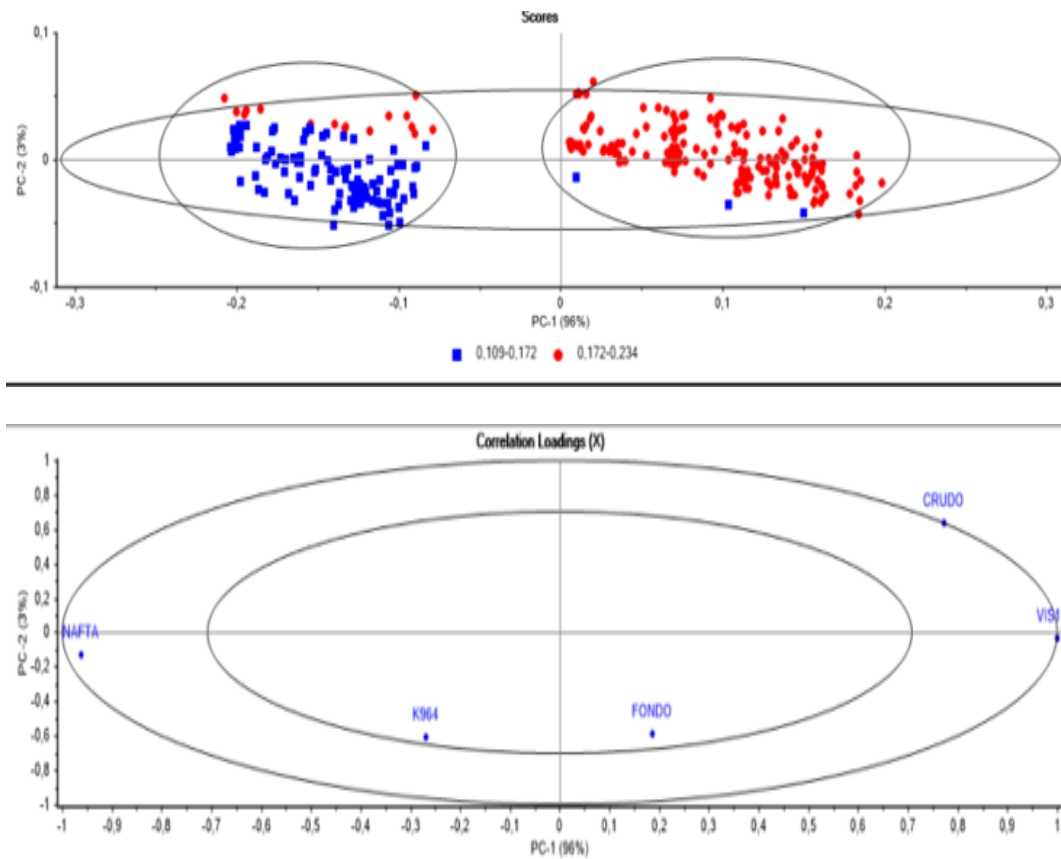


Con respecto al crudo, el afecta positivamente porque la mayor parte de la mezcla es pesada (color rojo), y va de arriba hacia abajo.

Para el caso del lado izquierdo (ver figura 14) existe poca presencia de crudo y la viscosidad tiende a ser liviana, son viscosidades livianas (color azul) aquellas donde hay mayor presencia de nafta.

Figura 14.

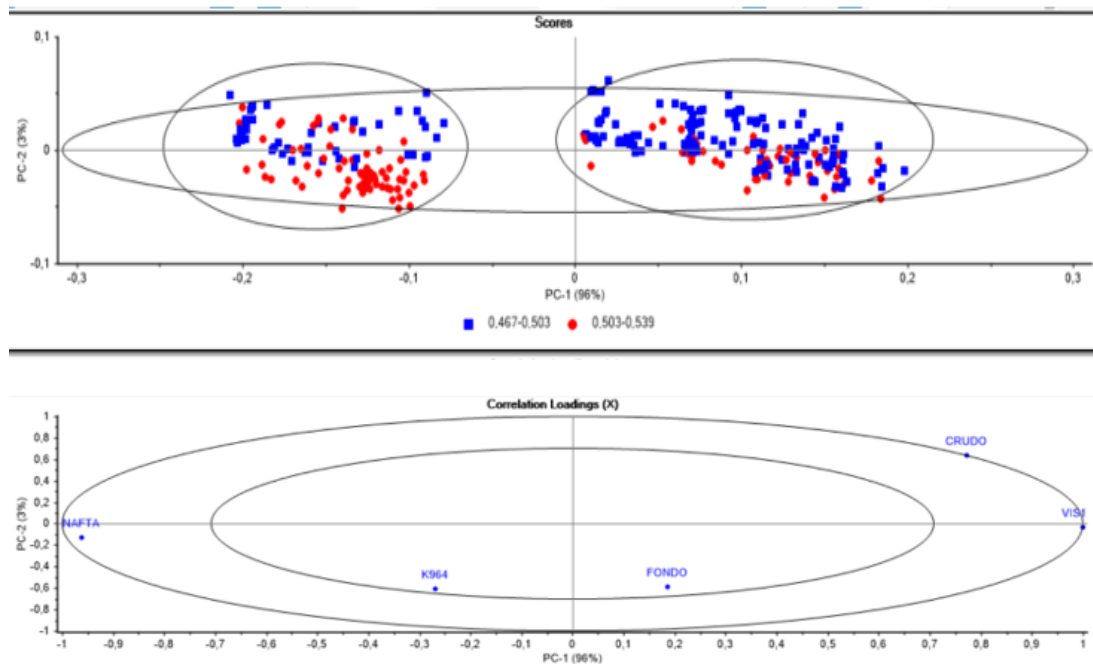
Tendencia de la mezcla con respecto al crudo



Con respecto al k964, afecta negativamente y va de abajo hacia arriba si se tiene mucho crudo la viscosidad se baja, (color rojo), debido a la poca presencia en mayor parte a la concentración de los fondos (color azul), ubicados al lado izquierdo, y al lado derecho. En otras palabras, donde hay poca presencia de crudo (color rojo) su viscosidad es alta.

Figura 15.

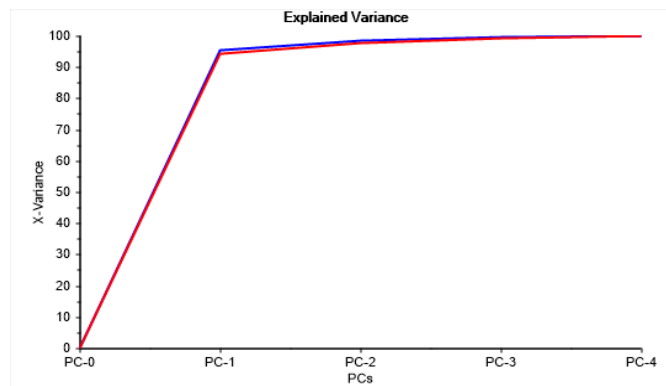
Tendencia de la mezcla con respecto al k964



En este estudio de análisis por componentes (PCA), tres componentes principales son suficientes para explicar mas del 95% de la variabilidad de las muestras, y se construyen tres planos (PC-1, PC-2, PC-3), lo cual es un buen resultado porque en PCA entre menos dimensiones menos ruido (ver figura 16).

Figura 16.

La varianza explicada



Ahora se realiza un chequeo para detectar los valores atípicos, se miran los histogramas de cada uno de los componentes.

Figura 17.

Histograma de fondo

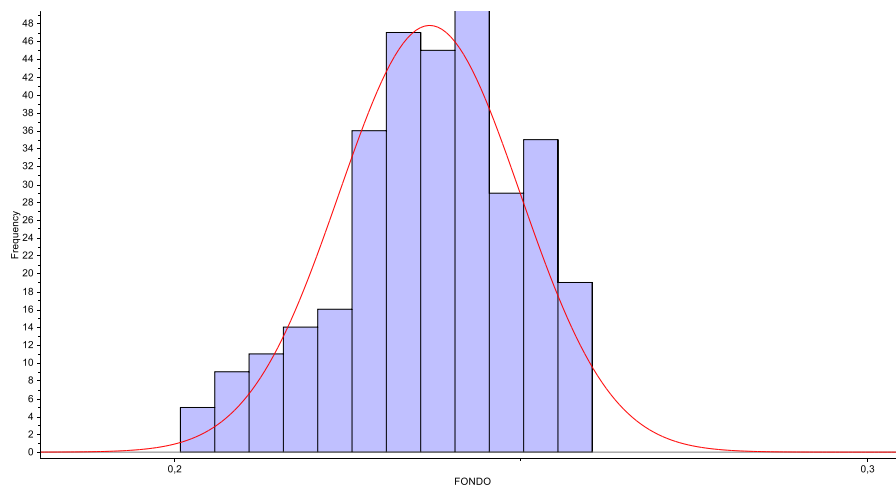
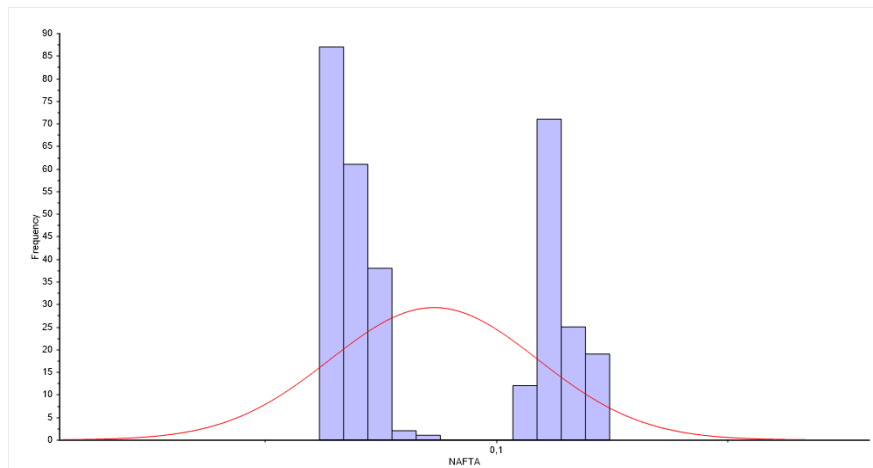


Figura 18.

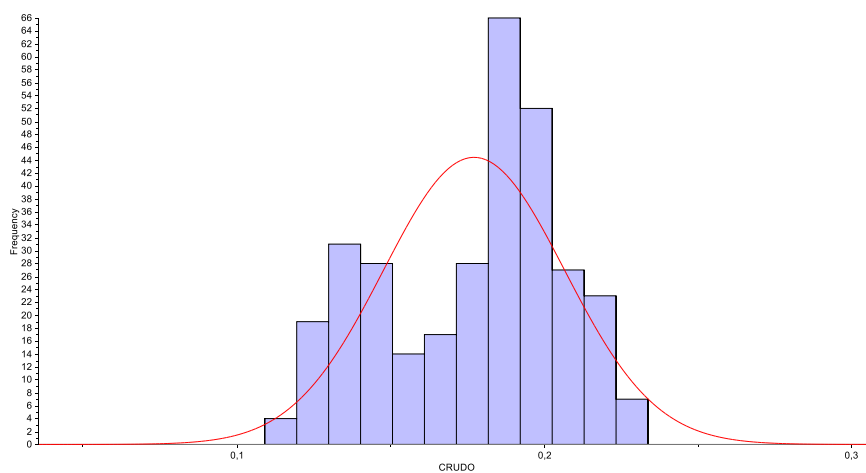
Histograma de nafta



Este histograma refleja los cambios en la nafta, a lo largo del tiempo. En la figura se diferencian dos grupos de datos (ver figura 18)

Figura 19.

Histograma de crudo

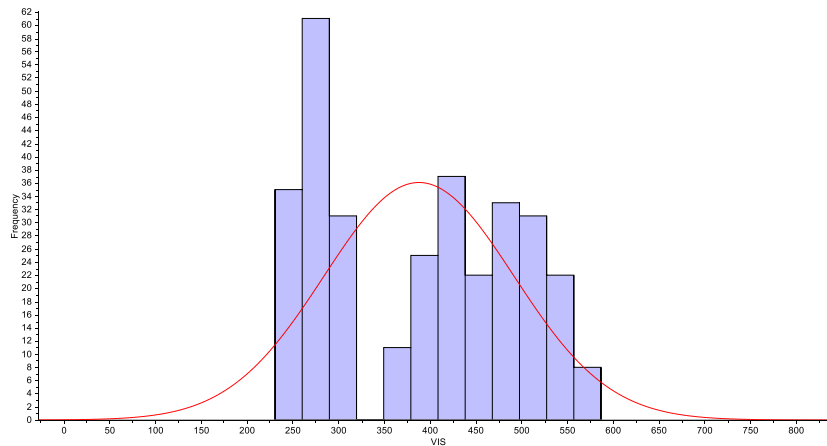


Comportamiento que muestra un pequeño cambio en el crudo, mostrándolo en dos grupos.

(ver figura 19)

Figura 20.

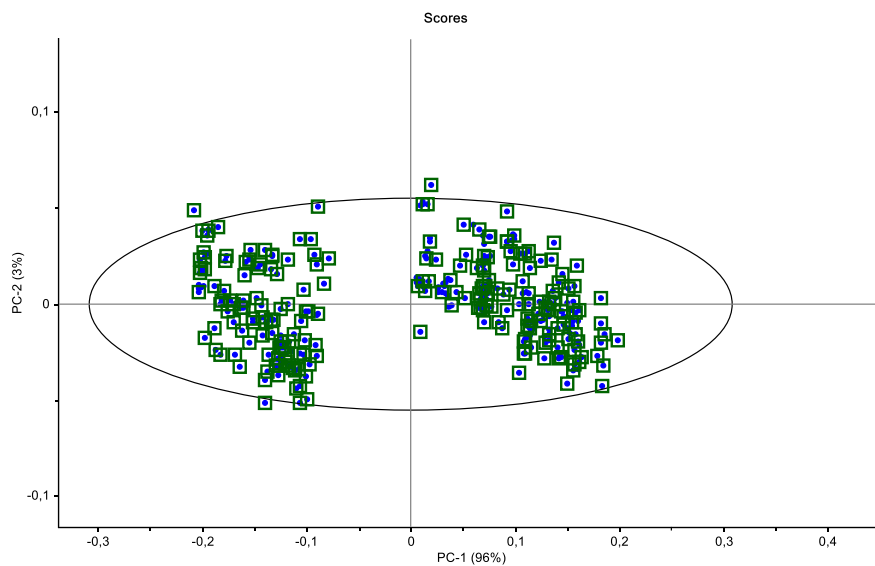
Histograma de k964



De los resultados anteriores se concluye que la fracción volumétrica de nafta es la que tiene más influencia en la variación de la viscosidad de la muestra. Se tomó en cuenta la tendencia negativa de como la nafta afecta la la viscosidad; es decir que se observó que un aumento del porcentaje de nafta conduce a una marcada disminución en la viscosidad (ver figura 10). Ahora bien, un uso excesivo de nafta conducirá a que la viscosidad disminuya dramáticamente incumpléndose así las condiciones de especificación. En lo que respecta a los otros componentes, su modificación no condujo a mayores fluctuaciones en la variable de respuesta.

Figura 21.

Gráfico de Kennard Stone

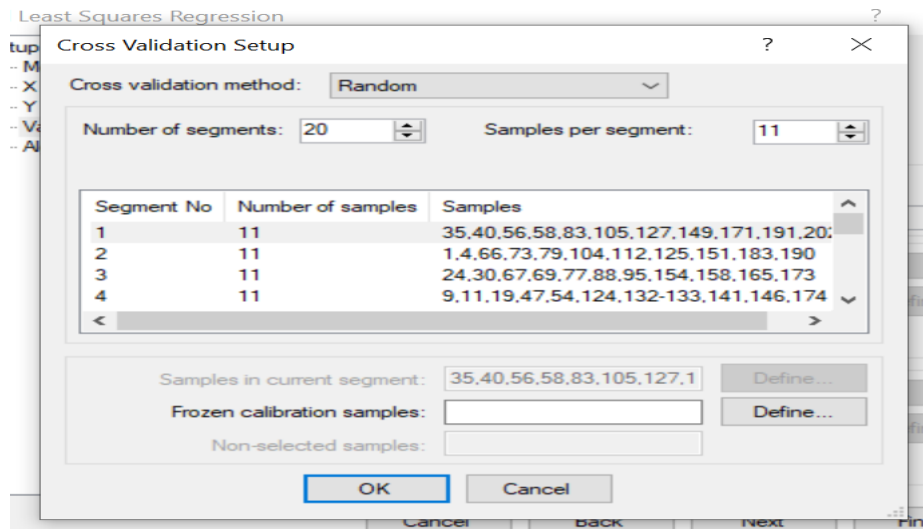


Muestra la selección de datos tomada por el algoritmo, 220 datos.

Se selecciona como modelo de regresión por mínimos cuadrados parciales, luego realiza una validación cruzada (ver figura 22), el software usó veinte segmentos de 11 muestras, y validó los parámetros del modelo con los datos restantes; sin incluir las once muestras seleccionadas, y la prueba que repite el ciclo iterativo veinte veces.

Figura 22.

Validación cruzada software The Unscrambler

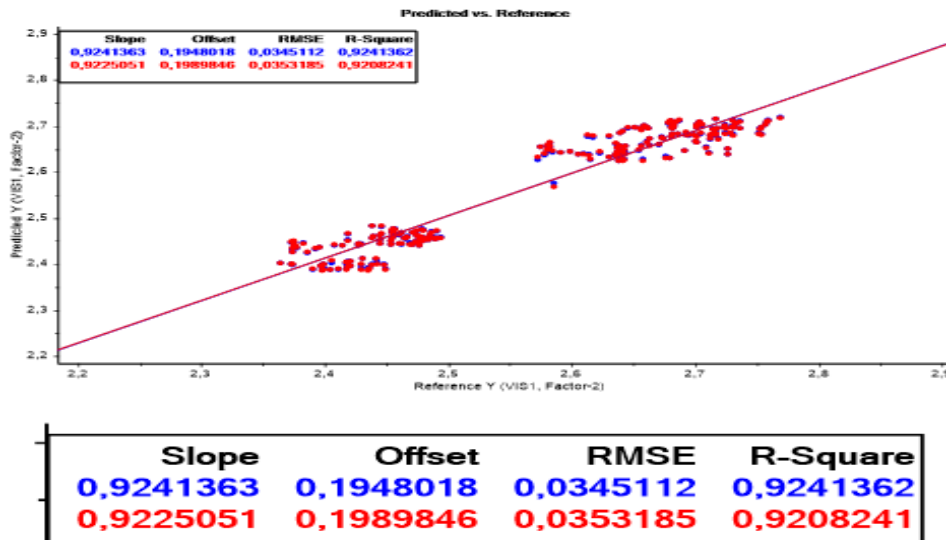


En la tabla de valores de la gráfica (Figura 23) se muestran los resultados del error cuadrático medio (RMSE). También llamado error de raíz cuadrada media (RMSE) el cual representa la desviación estándar de los valores residuales (errores de predicción). Los valores residuales son una medida de la distancia de los puntos de datos de la línea de regresión; para este modelo está con un valor de 0,035, es muy pequeño comparado con el error del modelo crudo que se encuentra de color azul en la tabla del gráfico (ver figura 23).

Se puede observar que los puntos predichos caen muy cerca de la muestra original. (figura 23.), en esta parte del proceso el software saca once muestras y prueba, esto se hace en el número de ciclos que se programaron (ver figura 22).

Figura 23.

Gráfico de predicción vs referencia

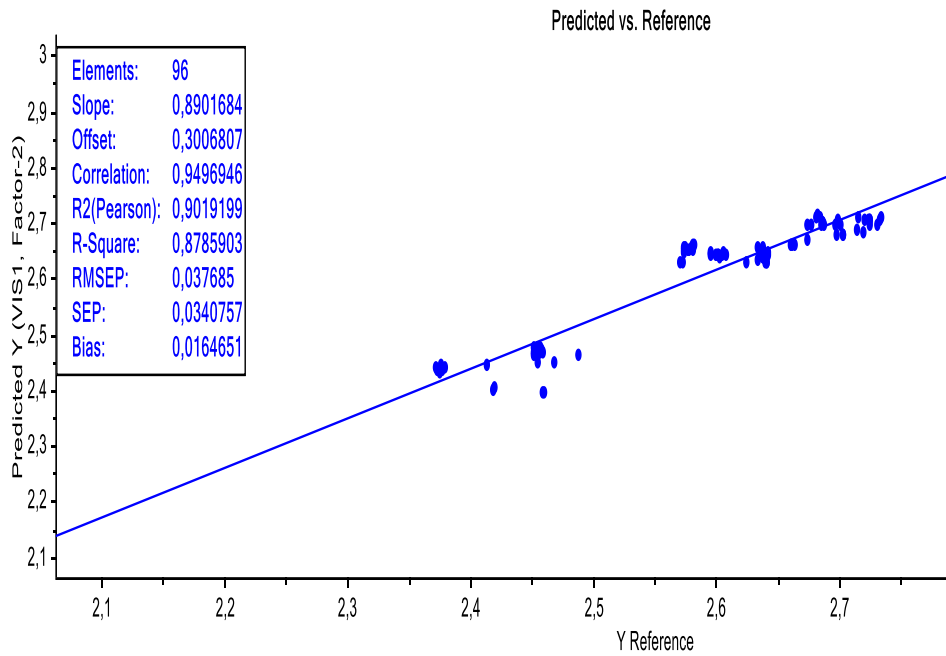


En este momento el modelo queda ajustado y se pasa a la validación del modelo, para esto se usaron. 96 muestras que fueron dejadas para la validación del modelo (ver figura 22), estas muestras no hacen parte de las que se usaron en el algoritmo KENNARD STONE (ver figura 21)

En el gráfico de validación del modelo se pueden observar dos grupos, esto quiere decir que en dos tiempos diferentes hubo cambios en la carga, que varían la viscosidad de los componentes usados para la preparación del crudo; pero se mantiene una linealidad.

Figura 24.

Grafico de Validación del modelo



La ecuación ecuación 6 permite estimar la viscosidad usando el porcentaje en volumen de cada uno de los componentes en la mezcla, con un margen de error promedio cuadrático de 0,035 que corresponde al modelo predicho (ver figura 23).

Esta predicción de viscosidad esta limitada para realizar predicciones en un rango de viscosidad desde 524 centipoise a 237 centipoise y temperatura constante de 30°C

Como resultado se logra el objetivo general, establecer una ecuación para predecir o estimar la viscosidad de la mezcla .

Fórmula para el cálculo de la viscosidad

$$\text{Log (Visc)} = 1,2656 + (2.3006 * \text{fondos}) + (-3,7443 * \text{Nafta}).....$$

$$+ (1,3864 * \mathbf{CR}) + (1,6932 * \mathbf{k964}) \quad \text{Ecu 6}$$

$$\text{Visc} = 10^{(\text{Log}(\text{vis}))}$$

Donde : fondos es el % en volumen del componente

Nafta es el % en volumen del componente

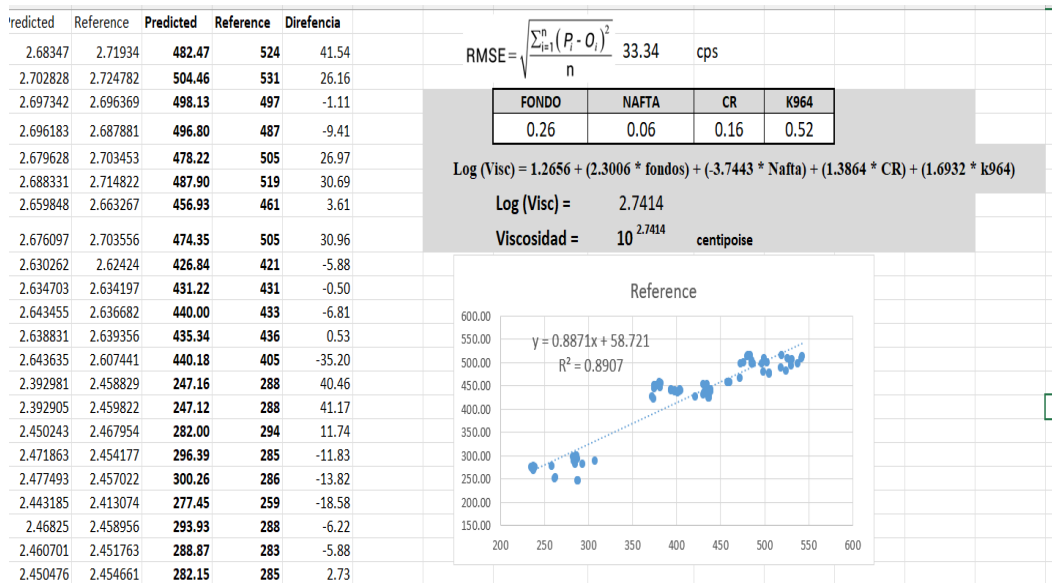
CR es el % en volumen del componente

k964 es el % en volumen del componente

En la ecuación 6 solo se debe ingresar el porcentaje en volumen de cada uno de los componentes, el resultado de la viscosidad está expresado como el logaritmo de la viscosidad, al cual se le debe aplicar el antilogaritmo para obtener la viscosidad de la mezcla en unidades de centipoise.

Figura 25.

Resultados del modelo



Para lograr conseguir el segundo objetivo específico de establecer el mínimo consumo de nafta, se tomó en consideración que la idea es gastar la mínima cantidad de nafta posible, pero a la vez se busca evacuar o consumir la mayor cantidad de fondos posibles y que el porcentaje de crudo no debe ser menor al 50%

se logra establecer que con un 6% de nafta, teniendo en cuenta que la idea principal es gastar menos nafta, pero a su vez se busca evacuar los fondos de vacío, también está que los porcentajes en volumen del crudo no debe ser menor del 50%; finalmente en lo que respecta al porcentaje de k964 éste se fijó en 52%, bajo estos supuestos el porcentaje de nafta que se minimizó fue del 6%.

5. Conclusiones

El estudio determinó que la variable con más impacto en el cambio de la viscosidad de la mezcla es la nafta, dado a que las otras fracciones de crudo codiluido no tuvieron un impacto apreciable sobre la viscosidad.

Una vez se ajustó la ecuación fue posible determinar que el valor de porcentaje volumétrico de nafta a usar es del 6%, con éste se consigue un crudo codiluido que cumple con las especificaciones.

El estudio encuentra una pequeña diferencia entre los resultados predichos con los observados, que no tienden a ser de mucha relevancia. Con un error cuadrático medio de 0,035, esto en promedio de viscosidad es de 33,3 centipoise.

6. Recomendaciones

El estudio recomienda hacer un análisis más a fondo de las corrientes de carga que ingresan a la unidad. Son cargas de mezclas de crudos que ingresan a la unidad 2000, que constantemente están variando, se observa que éstas pueden llegar a tener una influencia en los fondos de vacío.

Durante el tiempo del estudio se evidenció que no se toman muestras en los puntos de fondos de vacío, práctica importante en la operación, al igual que en otras unidades de topping de la empresa.

El estudio deja como punto de interés, el recomendar la toma de muestra de los fondos de vacío, debido a que estos son componentes de la mezcla que impactan fuertemente en la operación diaria, esto permitiría mejorar la predicción del modelo

Referencias bibliográficas

- Bjørn-Helge M., & W. (14 de Julio de 2022). *Estadística ITM*. Obtenido de pls-manual.pdf:
<https://estadisticaitm.github.io/pls.html>
- Díaz R. M, B. M. (17 de Mayo de 1995).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016236195002898>. Obtenido de
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016236195002898>
- García C.A. (Enero de 2010). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=3516741>. Obtenido de Optimización del transporte por oleoducto de crudo pesado Castilla:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=3516741>
- González Lizcano A. N, F. B. (2018). *Análisis de la viabilidad de la reducción del consumo de nafta para la dilución de crudos pesados utilizando crudos intermedios y livianos en Campo Rubiales*. Obtenido de Universidad de los Andes: <http://hdl.handle.net/1992/35042>
- Guerrero Espinoza C. R. (06 de Octubre de 2017). *Determinación de la Composición Óptima de Mezcla de Crudos Procesados en una Refinería, para Incrementar el Margen de Refinación. Tesis de grado Ingeniero químico*. Obtenido de
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/35042/u806788.pdf?sequence=1>:
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/35042/u806788.pdf?sequence=1>
- IBM. (14 de Abril de 2021). <https://www.ibm.com>. Obtenido de IBM documentación:
<https://www.ibm.com/docs/es/cloud-paks/cp-data/3.5.0?topic=overview-mean-squared->

