

**ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RELACIÓN CARGA-PRODUCTO EN LA
UNIDAD DE CRACKING MODELO IV DE LA REFINERIA DE
BARRANCABERMEJA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA
PRODUCCION EN BUSQUEDA DE OPORTUNIDADES PARA MAXIMIZAR
PRODUCTOS DE ALTO VALOR**

SUSANA LEÓN CÁCERES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2011**

**ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RELACIÓN CARGA-PRODUCTO EN LA
UNIDAD DE CRACKING MODELO IV DE LA REFINERIA DE
BARRANCABERMEJA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA
PRODUCCION EN BUSQUEDA DE OPORTUNIDADES PARA MAXIMIZAR
PRODUCTOS DE ALTO VALOR.**

SUSANA LEÓN CÁCERES

**Trabajo de grado modalidad práctica industrial, para optar al título de
Ingeniero Químico**

**Director:
CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA
Ingeniero Químico, MSc**

**Codirector:
JOSE RICARDO AMAYA ALVAREZ
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2011**

AGRADECIMIENTOS

A la *Universidad industrial de Santander* y a cada uno de mis docentes que contribuyeron en mi formación como profesional y como persona. Al profesor *Crisóstomo Barajas* por el apoyo en la realización del proyecto.

A *ECOPETROL S.A* por brindarme la oportunidad de formarme como profesional, por ofrecerme innumerable cantidad de conocimientos y por cada una de las experiencias de vida. Gracias por permitir que me formara en esta gran escuela.

A la *coordinación de programación de la producción* porque es un excelente equipo de trabajo, por haberme recibido como un miembro más del equipo de manera cálida, por su apoyo incondicional durante la realización de mis práctica. Su colaboración contribuyo en el alcance de mis objetivos.

A la Ing. *Liliana patricia Angulo* por su apoyo, animo y amistad.

Al codirector y tutor Ing. José *Ricardo Amaya* por apoyarme y acompañarme durante la realización de mi proyecto, por su confianza y por enseñarme lo importante que es la seguridad en mi misma.

Al Ing. *Jaime Fernando Villamizar* por su guía, colaboración, paciencia e incondicional apoyo.

DEDICATORIA

A Dios por cada oportunidad y obstáculo de mi maravillosa vida.

A mi papá Jesús León Bohórquez por enseñarme a soñar libremente, por su constante amor, paciencia, confianza y por ser mi soporte sin esperar nada a cambio. A mi mamá Gladys Cáceres Rozo, por ser el motor de mi vida que impulsa todos mis sueños, a los dos por ser mis mejores maestros y la razón de mi lucha.

A mis hermanos, sobrinas y a mi prima Diana por sus sonrisas y gratos momentos compartidos, por regalarme la esperanza del mañana y por motivarme a ser el mejor ejemplo.

A toda mi familia y amigos por brindarme su apoyo, compañía y amor incondicional.

A Sergio por brindarme apoyo absoluto durante el tiempo compartido.

SUSANA LEÓN CÁCERES

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	15
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	16
1.1 UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO MOD-IV [7].....	16
1.1.1 Productos obtenidos en el límite de batería de la U-300.	16
1.1.1.1 Aceite liviano de ciclo (ALC).....	16
1.1.1.2 Nafta.....	16
1.1.1.3 Butano-propano (GLP).....	17
1.1.1.4 Slurry.....	17
1.1.1.5 Gas seco	17
1.1.2 Explicación del proceso.....	17
1.1.2.1 Sección de precalentamiento de carga.	17
1.1.2.2 Sección catalítica.	17
1.1.2.3 Sección de Fraccionamiento	18
1.1.2.4 Sección de recuperación de vapores	18
1.2 DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN.....	18
1.3. CORRELACIONES Y CORRELACIONES PARCIALES.	19
2. METODOLOGÍA	20
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE LA UNIDAD MODELO IV (U-300).	21
2.2 SELECCIÓN DEL PRIMER GRUPO DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LOS RENDIMIENTOS Y CALIDADES DE LOS PRODUCTOS.	21
2.3 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA U-300 MEDIANTE LOS SISTEMAS <i>PI DATA</i> <i>LINK</i> [5] Y <i>CDLAB</i> [2] DE ECOPETROL S.A.	22
2.4 VERIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA MEDIANTE LOS SISTEMAS.	22
2.5 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN MEDIANTE DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN Y ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	22

2.6 DISCRETIZACIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO MEDIANTE EL CÁLCULO, ANÁLISIS DE CORRELACIONES Y CORRELACIONES PARCIALES.	23
2.7 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES MÁS INFLUYENTES MEDIANTE MEDIDAS DE DISPERSIÓN.	24
2.8 CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PRELIMINARES.....	24
3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	27
3.1 EFECTO DE CALIDADES DE CARGA SOBRE LOS RENDIMIENTOS DE LOS PRODUCTOS.	27
3.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN Y OTRAS VARIABLES DE LA SECCIÓN CATALÍTICA SOBRE LOS RENDIMIENTOS.....	32
3.3. COMPORTAMIENTO GENERAL DE LA U-300.	33
3.3.1 Modelos preliminares de la U-300.....	34
3.3.1.1. Modelo del rendimiento de ALC.	34
3.3.1.2. Modelo del rendimiento de Nafta.	35
3.3.1.3. Modelo del PFE de la nafta.	35
3.3.1.4. Modelo, Especificación de RVP	36
4. CONCLUSIONES	37
5. RECOMENDACIONES.....	38
BIBLIOGRAFIA.....	39
ANEXOS	40

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
FIGURA 1. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA.....	20
FIGURA 2. (PARTE A) SELECCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS DE CADA SECCIÓN.....	25
FIGURA 2. (PARTE B) SELECCIÓN DE VARIABLES ESPECÍFICAS DE CADA SECCIÓN.....	26
FIGURA 3. CONCENTRACIÓN DE NÍQUEL EN LA CARGA VS RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS Y RVP	27
FIGURA 4. CONCENTRACIÓN DE VANADIO EN LA CARGA VS RENDIMIENTO DE PRODUCTOS Y RVP	29
FIGURA 5. CONCENTRACIÓN DE SODIO EN LA CARGA VS RENDIMIENTOS DE PRODUCTOS Y RVP	30
FIGURA 6. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE REACCIÓN DURANTE EL AÑO 2010.....	32
FIGURA 7. COMPORTAMIENTO DE LOS RENDIMIENTOS DE NAFTA, ALC, SLURRY VS TRX	32
FIGURA 8. COMPORTAMIENTO DE LOS RENDIMIENTOS DE NAFTA, ALC Y SLURRY DURANTE EL AÑO 2010.....	33

LISTA DE TABLAS

	PÁG
TABLA 1. CORRELACIONES PARCIALES ENTRE CALIDADES DE CARGA Y REN. RVP.....	31

LISTA DE ANEXOS

	PÁG.
ANEXO 1. DIAGRAMA DE LA UNIDAD MODELO IV (U-300)	40
ANEXO 2. CONCENTRACIÓN DE METALES SOBRE EL CATALIZADOR, DURANTE EL 2010.	41
ANEXO 3. CORRELACIONES DEL RENDIMIENTO DE ALC CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.....	42
ANEXO 4. CORRELACIONES DEL RENDIMIENTO DE NAFTA CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.....	44
ANEXO 5. CORRELACIONES DEL PFE CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.....	45
ANEXO 6. CORRELACIONES DEL RVP CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo

ALC	=Aceite liviano de ciclo.
API	=Grados API
CRC	=Crudo reducido cusiana.
DCS	=Sistema de control distribuido.
GAO	=Gasóleo.
GLP	=Gas licuado del petróleo.
GRB	=Gerencia Refinería de Barrancabermeja.
KBD	=Kilo barriles por día
PFE	=Punto final de ebullición.
PIE	=Punto inicial de ebullición
RVP	=Presión de vapor Reid.
USD/B	=Dólares por barril.

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RELACIÓN CARGA-PRODUCTO EN LA UNIDAD DE CRACKING MODELO IV DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN EN BÚSQUEDA DE OPORTUNIDADES PARA MAXIMIZAR PRODUCTOS DE ALTO VALOR*.

AUTOR: SUSANA LEÓN CÁCERES**

PALABRAS CLAVES: Craqueo catalítico, nafta, aceite liviano de ciclo, diagramas de dispersión, correlaciones parciales.

DESCRIPCIÓN

La Coordinación de programación de producción de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), tiene como función planear la producción, mediante la programación de cargas y dietas en cada unidad de la refinería, enfocando sus objetivos a maximizar los productos de mayor valor. La calidad de los crudos actualmente cargados, afectan los procesos tanto en unidades de refinación y craqueo catalítico como en unidades aguas abajo del proceso. Debido a esto, se necesita analizar las relaciones carga-producto involucrada en las unidades de craqueo catalítico y entender el comportamiento de producción, en búsqueda de mejorar la obtención de productos valiosos como: nafta craqueada y aceite liviano de ciclo.

Con este trabajo, producto de la práctica industrial realizada en ECOPETROL S.A, se busco estudiar el comportamiento de la unidad modelo IV (U-300), según las cargas y respectivas calidades, durante el periodo del 2010 con el objetivo de identificar oportunidades de mejorar los rendimientos de productos valiosos: Nafta y aceite liviano de ciclo, y la obtención de una guía para el manejo de dietas en esta unidad.

Para realizar el estudio de cargas en la unidad U-300 son necesarias dos etapas: a) Revisión bibliográfica, con el objetivo de encontrar y enlazar fundamentos del proceso asociados a variables que intervienen en los rendimientos y calidades de productos; b) tratamiento de datos mediante aplicación de estadística descriptiva y análisis de correlación. La primera etapa, se enfocó al análisis de la U-300 y recopilación de información mediante *PI Data Link* [5]; Se seleccionó un conjunto de variables influyentes en los rendimientos. Posteriormente se comparó la información recopilada con información del DCS en la unidad, para verificar la coherencia de los datos. La segunda etapa corresponde al tratamiento de datos mediante estadística básica, se utilizó el software *Statística statsof* 8.0 sumado al conocimiento histórico sobre la unidad

* *Proyecto de grado. Modalidad Práctica Industrial.*

** *Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: MSc Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirector: Ing. Jose Ricardo Amaya Alvares.*

ABSTRACT

TITLE: PRELIMINAR ANALYSIS OR CHARGE-PRODUCT RATIO ON CRACKING UNIT MODEL IV OF BARRANCABERMEJA REFINERY OF TO DETERMINE THE PRODUCTION BEHAVIOR LOOKING FOR OPPORTUNITIES TO MAXIMIZE HIGH VALUE PRODUCTS*.

AUTHOR: SUSANA LEÓN CÁ CERES**

KEY WORDS: Catalytic cracking, naphtha, light cycle oil, scatterplots, partial correlations.

DESCRIPTION

Coordination of production programming of Barrancabermeja Refinery Management has as a function to planning production using scheduling loads and its diet in each one of the refining units, aiming to maximizing production of higher value products. The quality of oil introduced into the refinery, has an effect in the process on both refining and FCC units as well as downstream processing units. Because of this, it's necessary to analyze the load-product ratio involved in the FCC units and also understand the production behavior, looking forward to improve obtaining valuable products such as cracked naphtha and light cycle oil (LCO).

This work, resulting of the internship realized in ECOPETROL S.A is looking for to study the behavior of model unit IV according to loads and its qualities during 2010, with the objective to identify opportunities to enhance the performance of valuable products: Naphtha and LCO, and the creation of a guide to the management of the amount loaded in this unit.

To develop the study of loads in the FCC unit of Barrancabermeja Refinery it's necessary two relevant phases: a) Bibliographic review, to find and link the fundamentals of process associated to variables involved in performance and qualities of valued products; and b) Data treatment through the application of descriptive statistic and correlation analysis to discretize the studied system. The first phase, it was centered to analysis of model unit IV (U-300) and compilation of information through system PI Data Link [5]; initially it was selected a variable set with influence on performance. Finally, the information was compared to direct information of DCS in the unit to verify data coherence. The second phase, data treatment using basic statistic by the software Statistica Stasof 8.0 in addition to historical knowledge about the unit to discretize the studying system.

* *Project of grade. Industrial practice mode*

** *Faculty of Physicochemical Engineerings, School of Chemical Engineering. The director: MSc Crisóstomo Barajas Ferreira. Co-director: Ing. Jose Ricardo Amaya Alvares.*

INTRODUCCIÓN

La disminución de las reservas de petróleo y la alta demanda energética actual han generado la necesidad de utilizar crudos agrios a sabiendas de los numerosos inconvenientes operacionales que trae consigo el procesamiento de éstos.

Contaminantes, como Azufre, vanadio, níquel, micro-carbón residual, hierro y sodio son compuestos presentes en altas concentraciones en los crudos cargados diariamente a las unidades de refinación, que afectan la integridad de los equipos, calidad y rendimientos de los productos que deben cumplir estándares internacionales.

El rendimiento de las unidades de craqueo catalítico de la refinería de Barrancabermeja se ha visto fuertemente afectado por la alteración de las calidades en las cargas. Lo anterior conlleva al incumplimiento de las ventanas operativas que tienen como resultado inestabilidad en el proceso. Algunos de estos problemas traen como consecuencia: envenenamiento y ensuciamiento de los catalizadores y fenómenos de corrosión, siendo uno de los más importantes la sulfidación (que ocasiona una mala transferencia energética).

El presente trabajo se encuentra enfocado en la búsqueda de posibles correlaciones existentes entre variables asociadas al proceso y a la calidad de la carga contra los rendimientos, de modo que se puedan maximizar los productos valiosos tales como aceite liviano de ciclo (102,9 USD/B) y nafta craqueada (98,0 USD/B), ya que estos pueden convertirse posteriormente en diesel con el proceso de hidrotratamiento, siendo así un producto de más alto valor (111,4 USD/B).

Finalmente el análisis servirá como guía para la programación de dietas en la unidad de modelo IV según la producción deseada.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

El siguiente capítulo provee los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo del proyecto.

1.1 Unidad de craqueo catalítico MOD-IV [7]

Unidad puesta en funcionamiento el 13 de septiembre de 1954, la U-300 recibe como carga gasóleo y crudo reducido cusiana (CRC) que se mezclan a la entrada de la planta para lograr una carga homogénea.

La unidad modelo IV, puede utilizar como carga 100% gasóleo (GAO), o una carga combinada que consta de hasta 20% CRC y 80% GAO, dependiendo de los inventarios que se encuentren disponibles en la refinería.

Esta unidad puede cargar entre 12,5 – 17 KBD manteniendo un promedio de 13 KBD, siendo sus ventanas operativas para mantener las calidades de carga las siguientes: níquel (0,5 a 2,5 mg/kg), vanadio (0,5 a 4,5 mg/kg), Sodio (≤ 6 mg/kg), Hierro (≤ 3 mg/kg), API (21 a 24 grados API), Azufre ($< 0,8$ g/100g), PIE (360 a 420 °F), PFE (≤ 1150 °F), micro-carbón residual (0,4 a 1 g/100g).

1.1.1 Productos obtenidos en el límite de batería de la U-300.

1.1.1.1 Aceite liviano de ciclo (ALC). Producto hacia el cual se encuentra orientada la unidad modelo IV. Esta corriente se obtiene de la parte intermedia de la fraccionadora principal (T-301). La mayor parte de ALC se envía a almacenamiento, una menor cantidad se utiliza como material absorbente de pesados en la torre adsorbadora (T-303) y como fuente de calor en todo el proceso. El rendimiento promedio del año 2010 es de 26,32%.

1.1.1.2 Nafta. Es un producto de craqueo catalítico que se produce en la sección catalítica con una temperatura de ebullición de pentanos a 450 °F. Esta corriente

se obtiene por la cima de la T-301; posteriormente pasa por un proceso de estabilización y finalmente se remueven los butanos en la T-305. El rendimiento promedio del año 2010 es de 54.30%.

1.1.1.3 Butano-propano (GLP). (Gas licuado del petróleo) producto utilizado en el consumo interno de la refinría en las áreas de alquilación como olefinas y como gas de consumo domestico.

1.1.1.4 Slurry. Producto del fondo de la torre fraccionadora principal T-301, utilizado en la producción de fuel oil. El rendimiento promedio del año 2010 es de 4.520%.

1.1.1.5 Gas seco. El gas seco es el producto de cima de la Torre Adsorbedora T-303. Son gases en su mayor parte conformados por moléculas C_1 y C_2 . Se envía a las Unidades UOP II y Orthoflow, con facilidad para gas combustible, siendo muy importante el control de la concentración de azufre en esta corriente.

1.1.2 Explicación del proceso. Modelo IV es una unidad de craqueo catalítico del tipo convencional con un procesamiento lado a lado de reactor y regenerador, tuberías en U y velocidades incrementadas por medio de vapor. Dicha unidad consta de varias etapas:

1.1.2.1 Sección de precalentamiento de carga. El precalentamiento se da mediante un tren de precaliente que utiliza corrientes calientes del mismo proceso, de modo que exista aprovechamiento de la energía.

1.1.2.2 Sección catalítica. Consta de un reactor donde ocurre la reacción de craqueo y un regenerador donde se lleva a cabo la limpieza del catalizador.

1.1.2.3 Sección de Fraccionamiento. La torre fraccionadora T-301 es el equipo primario de la sección de fraccionamiento. En esta sección se separan los gases de salida del reactor en corrientes de slurry, APC, ALC, nafta y gases.

1.1.2.4 Sección de recuperación de vapores. Esta sección consta de tres torres: a) adsorbedora (T-303) donde se recupera parte del propano, propileno, butano y butileno de la carga gaseosa proveniente de la sección de compresión. b) Estabilizadora (T-304) allí se separa propano del hidrocarburo líquido, gasolina mayormente; y c) Debutanizadora (T-305) el líquido proveniente del fondo de la torre T-304 alimenta la debutanizadora en la cual la mayoría de los C_3 y C_4 presentes en la carga se remueven por la cima de la torre.

1.2 Diagramas de dispersión.

Un diagrama de dispersión es un grafico en el plano cartesiano para mostrar la relación entre dos o tres variables cuantitativas. El impacto visual muestra la posible existencia de correlación entre dos o tres variables con un vistazo rápido, simplificando con ello el análisis de situaciones numéricas complejas [8].

Es importante anotar que el diagrama de dispersión permite obtener conclusiones sobre la existencia de una relación entre dos variables, no sobre la naturaleza de dicha relación.

En la construcción de un diagrama de dispersión es importante cumplir las siguientes condiciones [8]:

- *En cantidad suficiente:* se considera necesario al menos 40 pares de datos para construir un diagrama de dispersión.
- *Datos correctamente emparejados:* se estudia la relación entre ambos.

- *Datos exactos*: Las inexactitudes afectan a su situación en el diagrama desvirtuando su apariencia visual.
- *Información completa*: Anotar las condiciones en que han sido obtenidos los datos.

Existen diferentes tipos de correlación; a) Fuerte, cuando los puntos se agrupan claramente alrededor de una línea imaginaria que pasa por el centro de la masa de los mismos, esta puede ser positiva o negativa según la pendiente de la línea que se ajuste a la nube de puntos. b) Correlación débil, los puntos no se encuentran lo suficientemente agrupados, también puede ser negativa o positiva; y c) Correlación compleja, la correlación no es simplemente lineal, o puede que no exista una correlación.

1.3. Correlaciones y correlaciones parciales.

La correlación es una medida de dependencia entre dos variables X y Y. Esta se define mediante la covarianza como:

$$\rho_{XY} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}}$$

La ventaja del uso de correlaciones es que esta medida es independiente de la escala. Sin importar que la escala de medida de la variable cambie, el valor de la correlación seguirá siendo el mismo [8].

La correlación es un valor absoluto que en ocasiones puede tomar valores menores o iguales a uno, si la correlación toma valores de cero, la covarianza también.

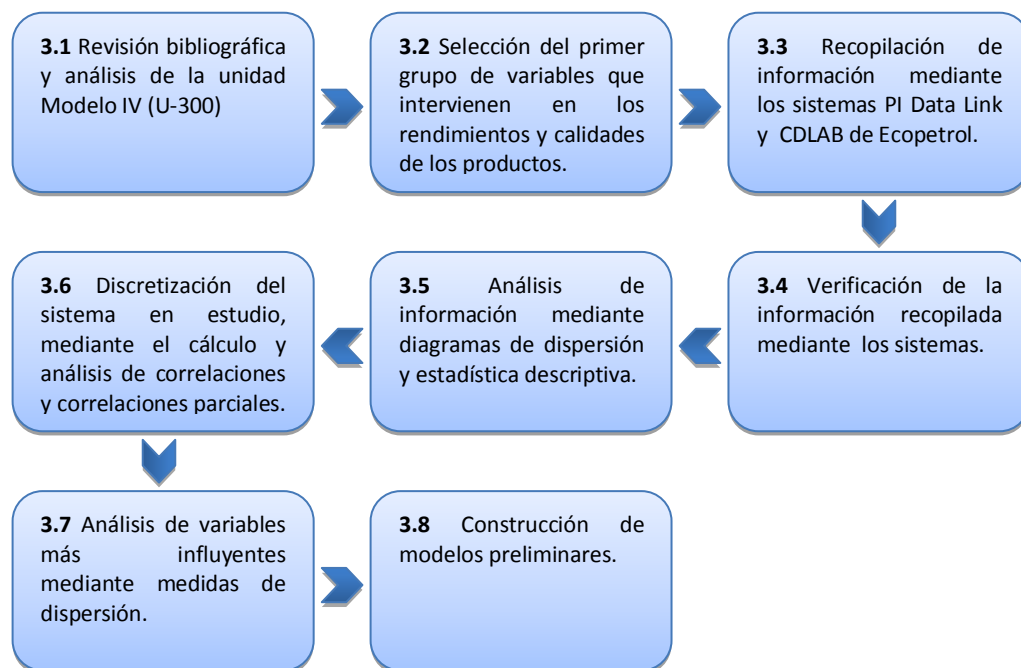
Los coeficientes de correlación simples miden el grado de asociación entre las variables X_i y X_j sin tener en cuenta las demás variables, mientras que los coeficientes de correlación parcial miden el grado de asociación X_i y X_j teniendo presente la posible influencia sobre estas dos variables del resto de las variables [4].

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las diferentes etapas cualitativas y cuantitativas necesarias para el desarrollo del trabajo.

En la Figura 1 se muestra el esquema general de la metodología seguida para el análisis preliminar del comportamiento de la unidad MOD-IV durante el periodo del 2010.

Figura 1. Esquema general de la metodología



Fuente: Autor del proyecto

A continuación se describe de manera detallada cada una de las etapas que conforman el desarrollo del proyecto.

2.1 Revisión bibliográfica y análisis de la unidad MODELO IV (U-300).

En la primera etapa del proyecto se revisó detalladamente los manuales de operación de la U-300 [3], se hizo reconocimiento de campo para entender el funcionamiento de la unidad y realizar una caracterización cualitativa.

Se efectuó un análisis específico de cada sección de la planta y se determinaron los puntos en los cuales hay medición para cada variable interna del proceso. Finalmente se identificaron los puntos y la frecuencia de muestreo para la realización de los análisis de calidades.

2.2 Selección del primer grupo de variables que intervienen en los rendimientos y calidades de los productos.

Para realizar esta primera selección de variables se tuvieron en cuenta conceptos técnicos y problemas históricos de la unidad. Se seleccionaron en total 60 variables del proceso y cinco variables respuesta.

Entre las variables del proceso se encuentran: calidades de carga, temperaturas y presiones que intervienen en las unidades de precaliente de carga, reactor (R-302), regenerador (R-301), Torre fraccionadora principal (T-301), torre adsorbedora (T-303), torre estabilizadora (T-304) y torre debutanizadora (T-305). Como variables respuesta se definieron los rendimientos de productos (nafta, aceite liviano de ciclo, slurry) y algunas de las especificaciones de calidad en la gasolina (RVP, punto final de ebullición).

En el bloque uno de la Figura 2 (A,B) . Se muestra el primer grupo de variables seleccionadas por sección de la unidad modelo IV.

2.3 Recopilación de información de la U-300 mediante los sistemas *PI Data Link* [5] y *CDLAB* [2] de Ecopetrol S.A.

El periodo de estudio fue de enero a octubre del año 2010; en noviembre y diciembre la planta entró en parada general. Se obtuvieron 303 casos de estudio para cada uno de los días consultados.

La información de variables operacionales se recopiló mediante el sistema *PI Data Link* [5] y la información de muestras de calidades en la carga se recopiló mediante el sistema *CDLAB* [2]. La frecuencia de muestreo para la carga fresca de la U-300 es de una semana y se realiza el día jueves, teniendo en cuenta que los programas de dietas son semanales y se oficializan el mismo día de muestreo, se supone un igual contenido de metales en la carga para toda la semana ya que se cuenta con un dato semanal.

2.4 Verificación de la información recopilada mediante los sistemas.

Con el objetivo de obtener la información más adecuada para el análisis, se verificó la información recopilada comparándola con información directa del DCS (*dispositivo de control que se encuentra en campo*). Finalmente se analizó mediante fundamentos técnicos, que los datos presentara valores coherentes.

2.5 Análisis de información mediante diagramas de dispersión y estadística descriptiva.

Como primer paso se calculó el valor promedio de cada variable seguido de la desviación estándar con ayuda del *Microsoft Office Excel 2007* para definir su tendencia, de modo que se pudieran identificar aquellas variables que presentaban mayor variabilidad.

Se estableció una primera idea sobre el tipo de relación existente entre las variables cuantitativas mediante un diagrama de dispersión; al mismo tiempo, se analizaron los diagramas y se eliminaron algunos casos de estudio, debido a que pertenecían a puntos atípicos.

Con ayuda del ingeniero de procesos de la unidad y el conocimiento histórico se identificaron los días en que la planta presentó problemas graves como: paradas no programadas, intercambiadores fuera de servicio entre otras y se eliminaron otros casos. Finalmente el sistema de estudio se redujo de 303 a 239 casos.

2.6 Discretización del sistema en estudio mediante el cálculo, análisis de correlaciones y correlaciones parciales.

Para el análisis de los 239 casos de estudio y las 65 variables del sistema se utilizó el *software Statistica statsoft 8.0*, mediante el cual se calcularon las correlaciones existentes entre las variables asignadas como independientes y dependientes, para medir el grado de influencia de variables de proceso y calidades de carga sobre los rendimientos y algunas especificaciones de calidad de la gasolina.

Posteriormente se realizó el cálculo de correlaciones parciales para el total de variables en estudio con el objetivo de discriminar variables de proceso mutuamente correlacionadas de manera positiva que al mismo tiempo estuvieran correlacionadas con los rendimientos de productos y especificaciones de calidad, y reducir los efectos de colinealidad múltiple.

Se estableció como grado de correlación aceptable el valor absoluto de $(0,1)$, lo que indica que correlaciones con valores por encima de este se tendrán en cuenta para analizar la influencia de dicha variable en el proceso.

2.7 Análisis de las variables más influyentes mediante medidas de dispersión.

En esta etapa se analizaron detalladamente aquellas variables del proceso que más influyen sobre los rendimientos y calidades de la gasolina según los valores de correlaciones. Se establecieron diagramas de dispersión para observar su comportamiento sobre el proceso y finalmente obtener conclusiones.

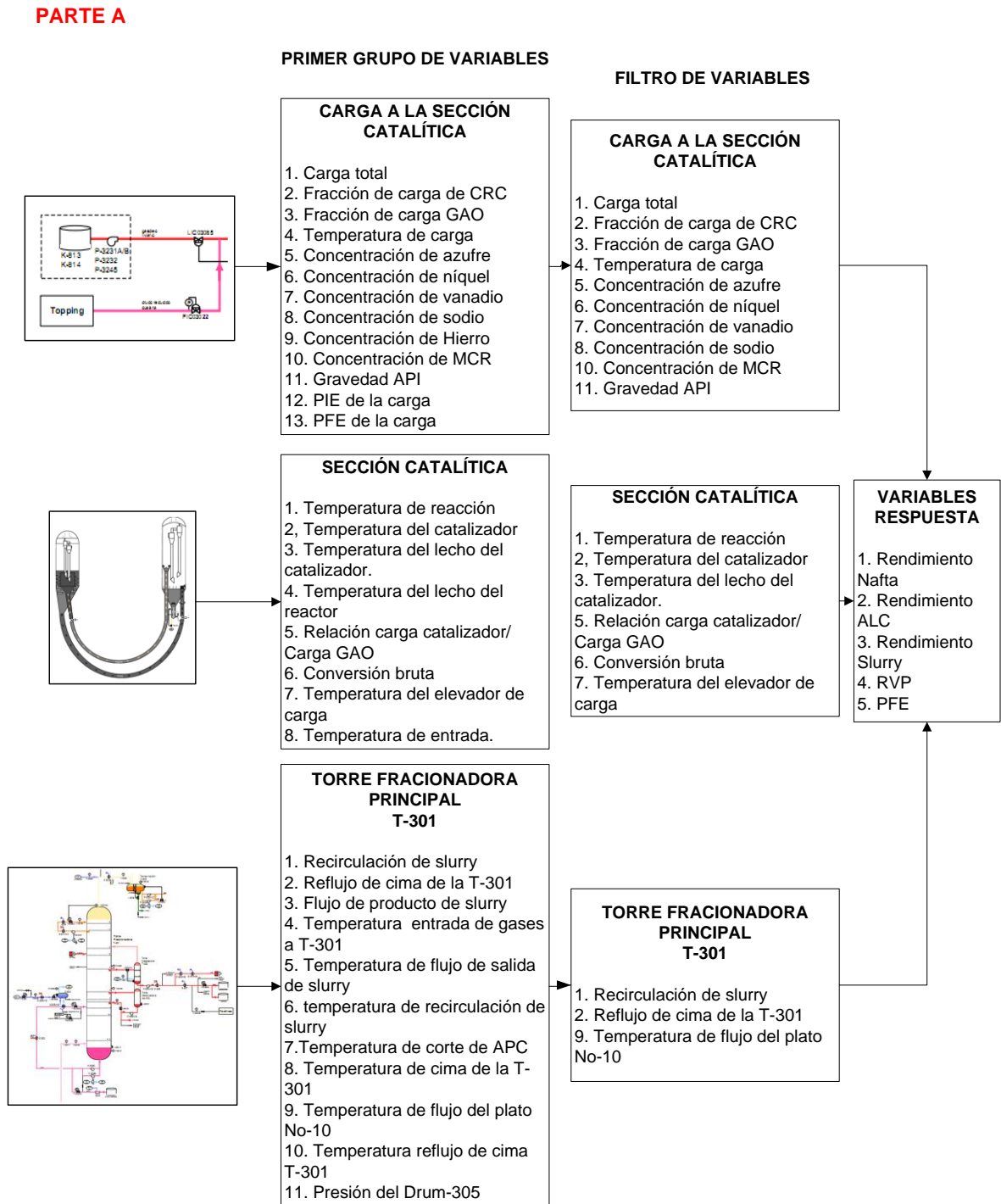
2.8 Construcción de modelos preliminares.

Luego de filtrar la información, se utilizó el 80% de esta para la construcción de modelos preliminares, el 20% de la información se utilizó para validación.

Se construyeron cuatro modelos: rendimiento de nafta, ALC, RVP, PFE. El planteamiento de los modelos se realizó mediante regresión lineal múltiple, utilizando la estimación de los parámetros por mínimos cuadrados [3].

En el segundo bloque de la Figura 2 (A, B). Se muestra las variables que finalmente pasaron el filtro y hacen parte de los modelos preliminares.

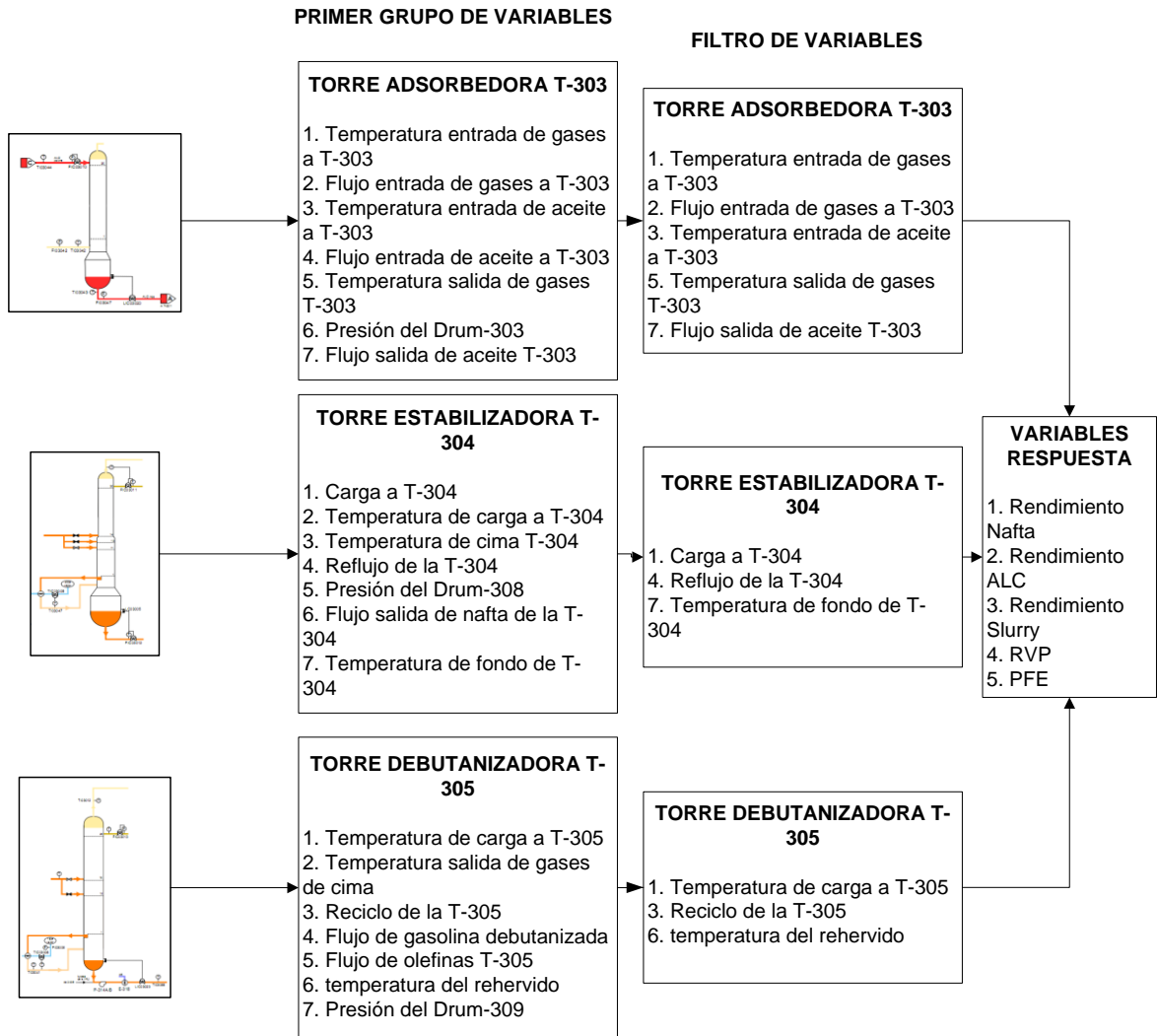
Figura 2. (PARTE A) Selección de variables específicas de cada sección.



Fuente: Autor del proyecto

Figura 2. (PARTE B) Selección de variables específicas de cada sección.

PARTE B



Fuente: Autor del proyecto

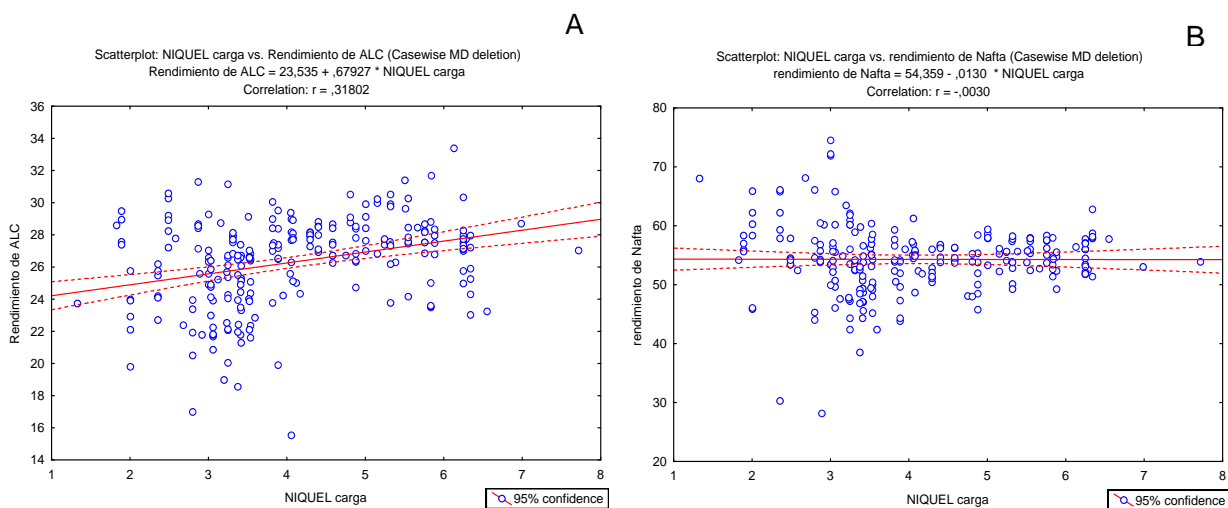
3. ANALISIS DE RESULTADOS.

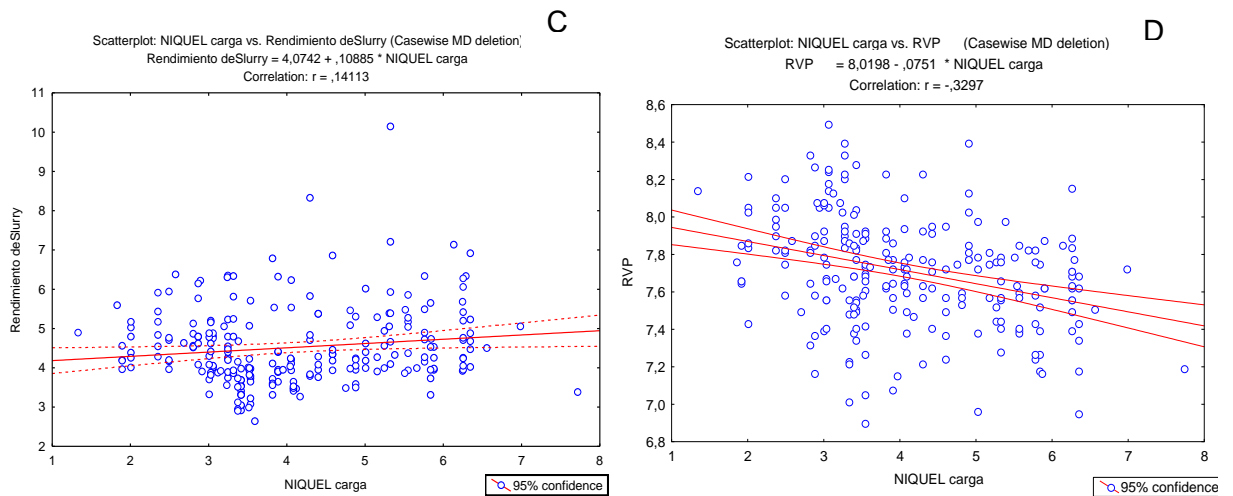
En el presente capítulo se muestran los resultados del comportamiento de la unidad modelo IV.

3.1 Efecto de calidades de carga sobre los rendimientos de los productos.

Mediante la discretización del sistema se encontró que existen unas variables más influyentes que otras en los rendimientos de las unidades, entre las cuales se encuentran las calidades de carga; por esta razón se hace importante llevar un control detallado de la carga fresca. A continuación se presentan los diagramas de dispersión y los cálculos de correlaciones realizados mediante el software *statistica statsoft 8.0*.

Figura 3. Concentración de níquel en la carga vs rendimientos de productos y RVP





Fuente: Autor del proyecto (*Statistica Statsoft 8.0*)

La Figura 3 muestra la influencia de la concentración de níquel sobre los rendimientos de nafta, ALC, slurry y sobre el parámetro de calidad RVP. En la Figura 3.A se muestra un comportamiento contrario al esperado ya que si se aumenta la concentración de níquel en la carga, existe un aumento significativo en el rendimiento de ALC con un valor de correlación de (0,31).

La Figura 3.B revela que el aumento en la concentración de níquel mantendrá constante el rendimiento de nafta. Esto se comprueba con el bajo valor de correlación (-0,003).

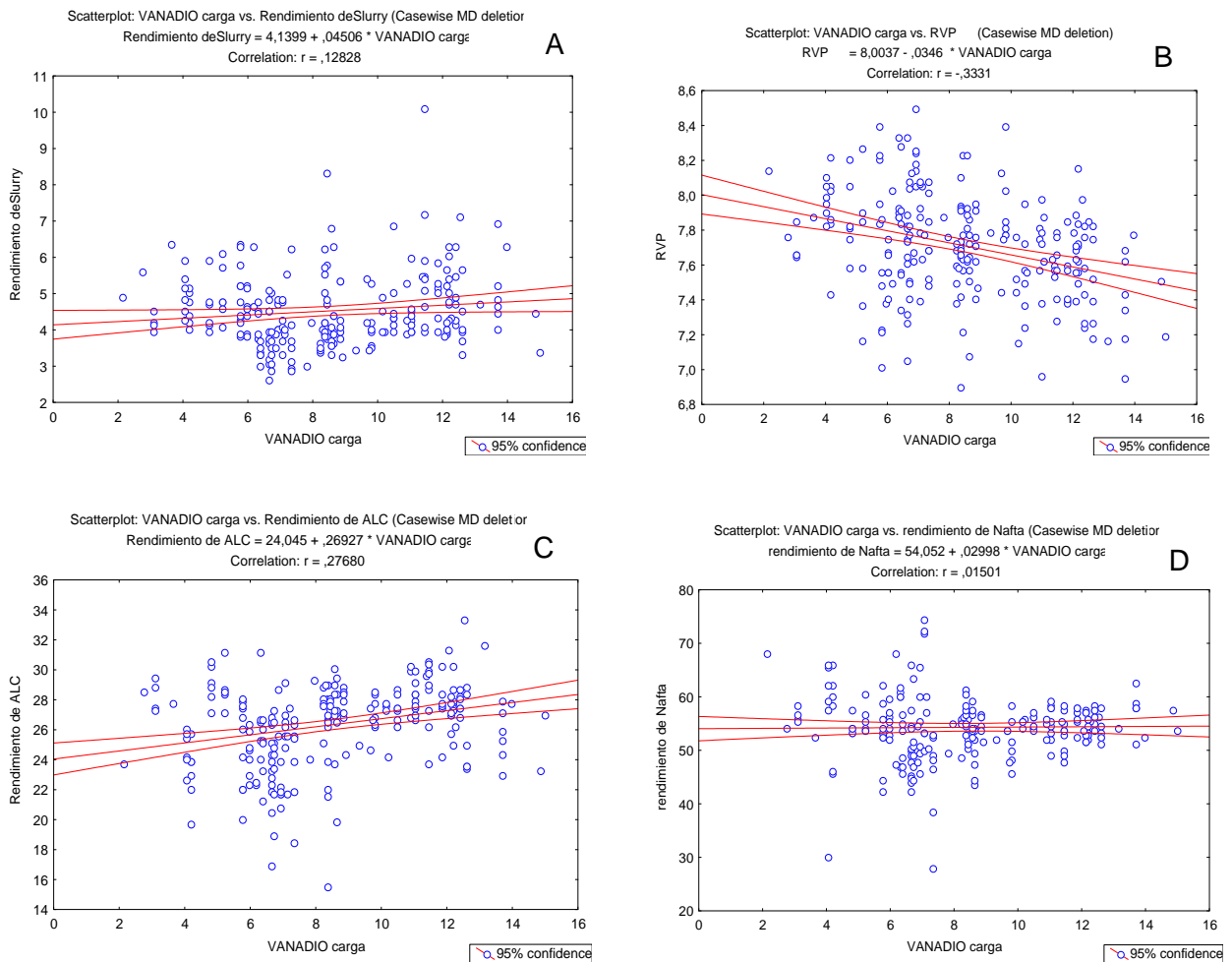
El comportamiento que se muestra en la Figura 3, en cuanto al rendimiento sería el deseado porque se estaría aumentando la producción de ALC, sin tener pérdidas de Nafta. El problema resulta en la rápida disminución del RVP de la nafta ya que este es un parámetro de calidad importante a controlar.

Las concentraciones de vanadio y níquel aumentan el rendimiento de ALC y Slurry manteniendo constante el de nafta como se muestra en la Figura 4 (A,B,C). En

ambos casos es posible que se presente una disminución en su expansión reduciendo el rendimiento de GLP y/o gas seco.

La correlación existente entre la concentración de níquel con el rendimiento de ALC tiene un valor 0,31, un poco mayor a la del vanadio 0,276.

Figura 4. Concentración de vanadio en la carga vs rendimiento de productos y RVP

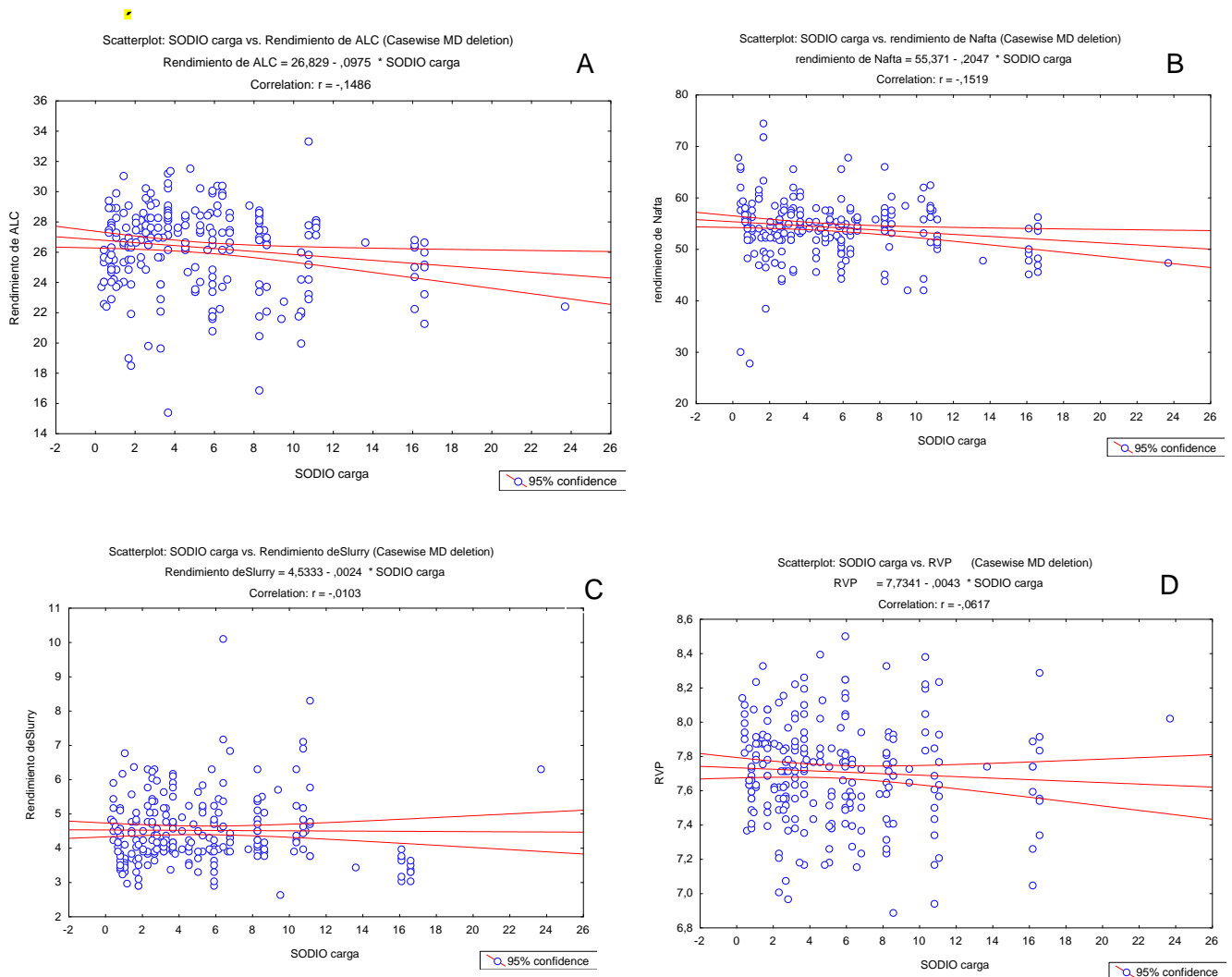


Fuente: Autor del proyecto (*Statistica Statsof 8.0*)

La concentración de sodio en la carga desfavorece levemente el rendimiento de aceite liviano de ciclo y nafta manteniendo constante el rendimiento de slurry, al mismo tiempo que no posee una correlación relevante con el RVP. Este comportamiento se puede observar en la Figura 5 (A,B,C,D).

A pesar de que el níquel, vanadio y sodio son metales, se presenta una disminución de rendimiento en productos valiosos para las concentraciones de sodio en la carga. Este efecto puede ser consecuencia de que el sodio se encuentra en forma de sal y sobre todo que a lo largo de todo el proceso esta sal es muy resistente a la hidrólisis.

Figura 5. Concentración de sodio en la carga vs rendimientos de productos y RVP



Fuente: Autor del proyecto (*Statistica Statsof 8.0*)

La concentración de estos compuestos sobre el catalizador obedece a un comportamiento similar sobre los rendimientos (ver ANEXO 2). Además las correlaciones parciales aseguran una dependencia lineal pequeña pero existente. En la Tabla 1 se listan las correlaciones parciales.

	MRC	NIQUEL carga	SODIO carga	VANADIO carga	Ren. de Nafta	Ren. de ALC	RVP	PFE nafta	Ren. Slurry
MCR	1,000	0,200	-0,254	0,286	-0,066	0,030	-0,038	-0,148	0,099
NIQUEL carga	0,200	1,000	0,177	0,960	-0,099	0,131	-0,152	-0,131	0,049
SODIO carga	-0,254	0,177	1,000	0,125	-0,101	-0,145	-0,152	-0,099	0,141
VANADIO carga	0,286	0,960	0,125	1,000	-0,070	0,102	-0,186	-0,117	0,071
Ren. Nafta	-0,066	-0,099	-0,101	-0,070	1,000	0,007	-0,021	0,133	-0,037
Ren. ALC	0,030	0,131	-0,145	0,102	0,007	1,000	-0,105	-0,118	-0,495
RVP	-0,038	-0,152	-0,152	-0,186	-0,021	-0,105	1,000	0,161	0,033
PFE nafta	-0,148	-0,131	-0,099	-0,117	0,133	-0,118	0,161	1,000	0,071
Ren. Slurry	0,099	0,049	0,141	0,071	-0,037	-0,495	0,033	0,071	1,000

Tabla 1. Correlaciones parciales entre calidades de carga y REN. RVP

Fuente: Autor del proyecto (*Statistica Statsof 8.0*)

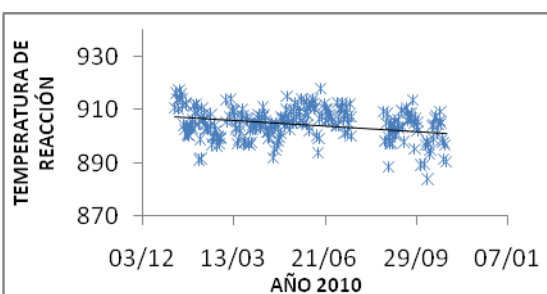
A diferencia del valor de correlación, las correlaciones parciales mostradas en la Tabla 1 representan la influencia directa entre las dos variables estudiadas, ya que se puede mantener controladas las demás variables independientes del proceso [5]. Debido a lo anterior el valor de la correlación disminuye ya que no se tiene en cuenta el efecto de ninguna otra variable.

Los valores de correlaciones entre las concentraciones de azufre en la carga y los rendimientos de nafta, ALC y slurry son: (0,21703), (0,1633), (0,2763) respectivamente, pero los valores de correlaciones parciales son mucho menores que el valor absoluto de (0,1). Comportamientos similares se presentaron con la concentración de hierro y micro-carbón.

3.2. Efecto de la temperatura de reacción y otras variables de la sección catalítica sobre los rendimientos.

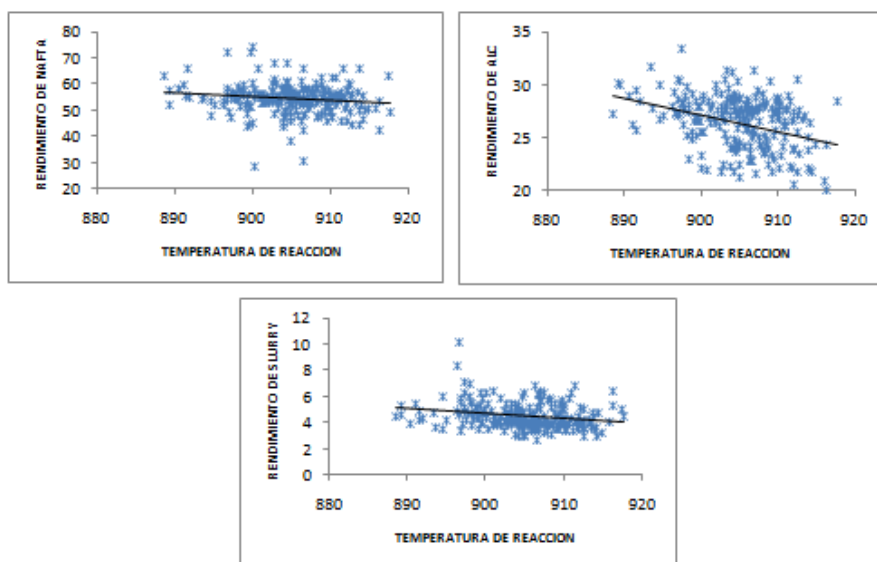
Se estudió el comportamiento de la temperatura de reacción a través del año 2010 mostrado en la Figura 7, lo cual evidenció una disminución en el tiempo, como se muestra en la Figura 6. Esta disminución es debida a la orientación de la unidad 300 hacia la producción de ALC, ya que al aumentar la temperatura de reacción la tendencia del rendimiento de ALC es a disminuir fuertemente, mientras que el rendimiento de nafta se mantiene constante y el rendimiento de slurry disminuye de manera muy leve, estos comportamientos indican que posiblemente la unidad produciría ALC contra la producción de GLP y/o Gas seco.

Figura 6. Comportamiento de la temperatura de reacción durante el año 2010



Fuente: Autor del proyecto

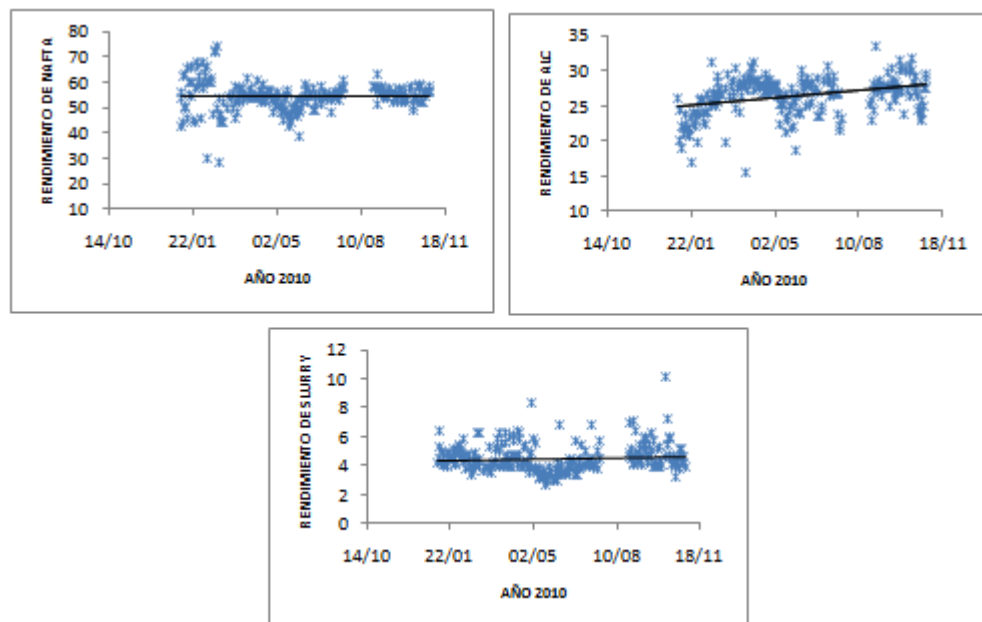
Figura 7. Comportamiento de los rendimientos de nafta, ALC, slurry Vs Trx



Fuente: Autor del proyecto

La figura 8 muestra el comportamiento de los rendimientos de algunos productos a través del tiempo [9], en la cual se observa que a lo largo del año 2010 aumentaron los rendimientos de ALC debido a que la temperatura de reacción fue disminuyendo ya que esta disminución no representa caída de rendimiento de nafta.

Figura 8. Comportamiento de los rendimientos de nafta, ALC y slurry durante el año 2010.



Fuente: Autor del proyecto

3.3. Comportamiento general de la U-300.

A través de toda la unidad modelo IV se encontraron variables que influyen de manera positiva y negativa en cada uno de los rendimientos, pero existe una característica especial en el comportamiento del año 2010, las variables asociadas

a calidades de carga, sección catalítica y torre fraccionadora principal T-301 poseen más relación con el rendimiento de ALC, mientras que las variables asociadas al tren de recuperación de vapores que contempla la torre adsorbedora, estabilizadora y debutanizadora se relacionan mas con el rendimiento de nafta, (véase el diagrama general de la U-300 en el Anexo 1).

3.3.1 Modelos preliminares de la U-300. A partir de los datos recopilados y filtrados previamente se ajustaron modelos preliminares a las variables dependientes del sistema: rendimientos de ALC, Nafta y parámetros de calidad como RVP Y PFE los cuales se presentan a continuación.

3.3.1.1. Modelo del rendimiento de ALC.

$$\begin{aligned}
 R. ALC = & 0,0304193 + 0,583999X_1 - 0,553579X_2 - 0,040516X_3 - 0,831954X_4 \\
 & + 0,688234X_5 + 0,355556X_6 - 0,040157X_7 - 0,085345X_8 + 0,017191X_9 \\
 & + 0,044817X_{10} - 0,032255X_{11} - 0,347486X_{12} \\
 & + 0,064667X_{13} (+, -) 2,64363409
 \end{aligned}$$

$X_1 =$ Carga de CRC, $X_2 =$ Carga de GAO, $X_3 =$ Temp de Carga total, X_4
 $=$ gravedad API de la carga

$X_5 =$ MRC, $X_6 =$ Con. Niquel en la carga, $X_7 =$ Con. Vanadio en la carga, X_8
 $=$ Con. sodio en la carga, $X_9 =$ Temp RX

$X_{10} =$ Temp cat RX , $X_{11} =$ Temp lecho cat , $X_{12} =$ Conversion bruta, X_{13}
 $=$ Temp del elevador de carga

$$r^2 = 0,99952836$$

3.3.1.2. Modelo del rendimiento de Nafta.

$$\begin{aligned} R. Nafta = & 0,005543 - 0,003190X_1 + 0,010988X_2 - 0,002447X_3 + (8,09E - 05)X_4 \\ & - 0,246351X_5 + 0,338047X_6 - 0,171047X_7 - 0,030160X_8 + 0,484432X_9 \\ & - 0,331500X_{10} + 0,061598X_{11} + 0,527612X_{12} (+, -)42567212 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_1 = \text{Carga total} \quad X_2 = \text{Temp de Carga total}, \quad X_3 = \text{Con. Azufre en PPM}, \quad X_4 \\ = \text{gravedad API de la carga} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_5 = \text{Con. sodio}, \quad X_6 = \text{Temp E. gases } T - 303, \quad X_7 = \text{Temp E. aceite } T - 303, \quad X_8 \\ = \text{Temp S. Gases } T - 303, \quad X_9 = \text{Temp S aceite } T - 303 \end{aligned}$$

$$X_{10} = \text{Temp carga } T - 304, \quad X_{11} = \text{Control Temp fondo}, \quad X_{12} = \text{Temp Carga } T - 305$$

$$r^2 = 0,99603$$

3.3.1.3. Modelo del PFE de la nafta.

$$\begin{aligned} PFE - Nafta = & -107,954549806124 - 0,00206452611171673X_1 - 62,1437656515403X_2 \\ & - 45,8475193044015X_3 + 0,000617544298432914X_4 \\ & - 4,18491075631355X_5 - 0,0454209380284153X_6 \\ & - 0,474812733085395X_7 + 4,96552803503394X_8 + 0,220054189764781X_9 \\ & + 0,0124336272792894X_{10} - 0,0410634964521485X_{11} \\ & + 0,174157278861208X_{12} + 0,804965729133779X_{13} \\ & - 0,151156433956561X_{14} + 1,097109865191681X_{15} \\ & - 0,648916574878675X_{16} + 0,0105882939656375X_{17} \\ & + 0,0950499293969903X_{18} + 0,0353188860158796X_{19} \\ & - 0,0352294805838521X_{20} \\ & - 0,0296647257485868X_{21} (+, -)10,5880878841849 \end{aligned}$$

$X_1 =$ Carga total, $X_2 =$ Carga de CRC, $X_3 =$ Carga de GAO, $X_4 =$ Con. Azufre ppm

$X_5 =$ MRC, $X_6 =$ Con. Niquel en la carga, $X_7 =$ Con. Vanadio en la carga, X_8
= Relacion catalizador carga

$X_9 =$ Temp del elevador de carga , $X_{10} =$ R - Slurry, $X_{11} =$ R - cima T - 301, X_{12}
= Temp del Fondo del plato #10

$X_{13} =$ Temp de E. gases T - 303 , $X_{14} =$ Temp de E. Aceite T - 303, X_{15}
= Temp S. gases T - 303

$X_{16} =$ Temp de S. aceite T - 303 , $X_{17} =$ Carga de la T - 304 , X_{18}
= Control de Temp fondo

$X_{19} =$ Temp Carga de la T - 305, $X_{20} =$ R. de la T - 305, $X_{21} =$ Temp del rehervidor

$$r^2 = 1,00$$

3.3.1.4. Modelo, Especificación de RVP

$$\begin{aligned} RVP = & 0,00016475 - (9,3609E - 05)X_1 + 0,00025837X_2 - 0,0006656X_3 + 0,0050455X_4 \\ & + 0,00017741X_5 - 0,00270394X_6 - 0,01290817X_7 + 0,00672134X_8 \\ & + 0,00583385X_9 - 0,00040992X_{10} + 0,00024804X_{11} + 0,01925289X_{12} \\ & + 0,00113507X_{13} - 0,00708951X_{14} (+, -) 0,256611397188277 \end{aligned}$$

$X_1 =$ Carga de CRC, $X_2 =$ Carga de GAO, $X_3 =$ Temp de Carga total, X_4
= gravedad API de la carga

$X_5 =$ MRC, $X_6 =$ Con. Niquel en la carga, $X_7 =$ Con. Vanadio en la carga, X_8
= Temp de RX

$X_9 =$ Temp cat RX , $X_{10} =$ R - Cima T - 301, $X_{11} =$ R - Slurry, X_{12}
= Temp E. de gases T - 303, $X_{13} =$ Reflujo de T - 304, X_{14}
= Temp de Reervidor T - 305

$$r^2 = 0,99912318647412$$

4. CONCLUSIONES

La carga combinada de CRC y GAO aumenta significativamente el rendimiento de ALC sin disminuir el rendimiento de nafta, debido al aumento de concentración de metales (Níquel + Vanadio) en la carga fresca durante el año 2010.

La frecuencia de muestreo no es efectiva para llevar control en la calidad de las cargas, se necesita un mayor monitoreo de tal forma se podría tener un mayor control sobre la calidad y al mismo tiempo sobre la producción.

Por medio del análisis de correlación se evidencia que las variables asociadas a las calidades de carga y a torre fraccionadora principal T-301 impactan en mayor medida el rendimiento de ALC.

Los coeficientes de correlación calculados revelan mayor influencia de las variables pertenecientes a la unidad de recuperación de vapores en el rendimiento de nafta, en la que intervienen las siguientes variables (Temperatura de entrada de gases a la torre adsorbedora T-303, Temperatura de salida de gases a la torre adsorbedora T-303, Temperatura de entrada de aceite a la torre adsorbedora T-303, Temperatura de salida de aceite a la torre adsorbedora T-303, temperatura de carga a la torre estabilizadora T-304, Temperatura de fondo de la torre estabilizadora T-304, Temperatura de entrada de a la torre debutanizadora T-305).

Es factible establecer modelos lineales para relacionar las calidades de las cargas con los rendimientos de los productos.

5. RECOMENDACIONES

Aumentar la frecuencia y tipos de análisis de calidad realizados en cada una de las corrientes tanto en las cargas como dentro de la unidad, de forma que se tenga mayor data para realizar un estudio más detallado y un control más efectivo.

Realizar el estudio preliminar para las otras plantas de craqueo catalítico: UOP-I, UOP-II y Orthoflow.

Realizar una evaluación económica y de riesgos en la unidad modelo (IV), al introducir una carga más pesada.

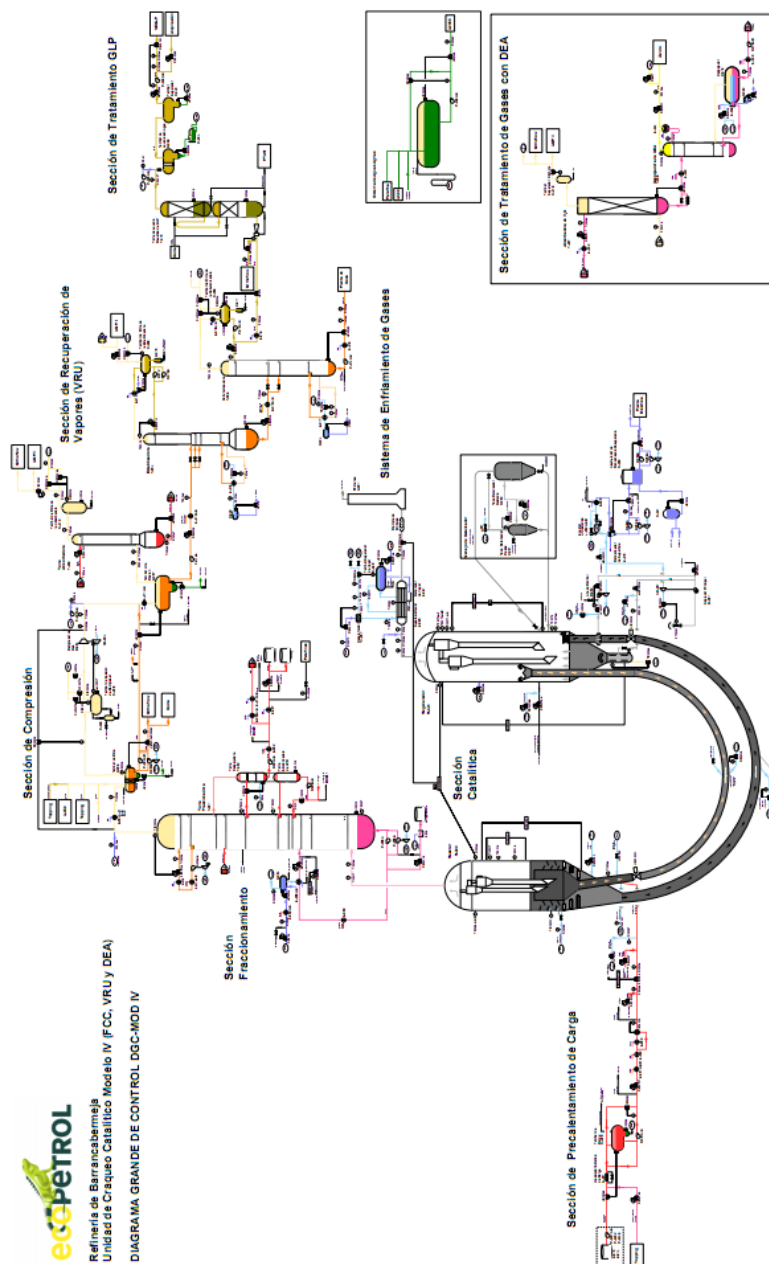
Debido a que el sodio es uno de los metales que causa más problemas, se recomienda establecer un plan efectivo de control de este compuesto a lo largo del proceso de refinación, antes del proceso de cracking.

BIBLIOGRAFIA

1. CASTILLO MANRIQUE, Isabel. GUIJARRO GARVI, Marta. Estadística descriptiva y cálculo de probabilidades: Madrid (España): PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2006. P 319-330.
2. CDLAB, Sistema de información interno de Ecopetrol S.A.
3. MONTGOMERY, RUNGER. Probabilidad y Estadística: aplicada a la ingeniería, 2ª ed. México: Limusa wiley, 2002. P 483 a 497.
4. PÉREZ LÓPEZ, César. Técnicas Estadísticas con SPSS^R 12: Aplicaciones al Análisis de Datos, 12 ed, Madrid (España): PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2005.P 259, 260. (59.2). (84-205-4410-8).
5. PI Data Link Cd, Sistema de información interno de Ecopetrol S.A.
8. STATSOFT ELECTRONIC STATISTICS TEXTBOOK (Version de prueba). Basic Statistics [en línea]. < <http://www.statsoft.com/textbook/basic-statistics/?button=1>>
7. VICEPRESIDENCIA DE REFINACIÓN Y PETROQUÍMICA, GERENCIA COMPLEJO BARRANCABERMEJA. Manual de descripción de procesos de la unidad de craqueo catalítico Modelo IV. 1ª ed, Barrancabermeja, 2008.
8. WOLFGANG HARDLE, LÉOPOLD SIMAR. Applied Multivariate Statistical Analysis: Versión Uno: Method and Data Technologies, 2003. P 30,31,86.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de la unidad modelo IV (U-300)



Anexo 2. Concentración de metales sobre el catalizador, durante el 2010.

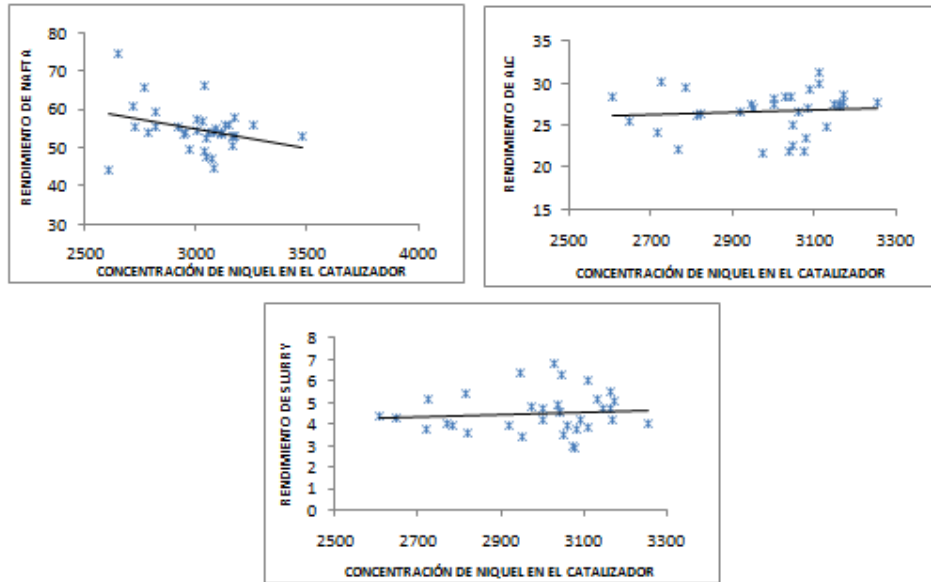


Imagen 2. CONCENTRACIÓN DE NIQUEL SOBRE EL CATALIZADOR Vs LOS RENDIMIENTOS DE NAFTA, ALC Y SLURRY.

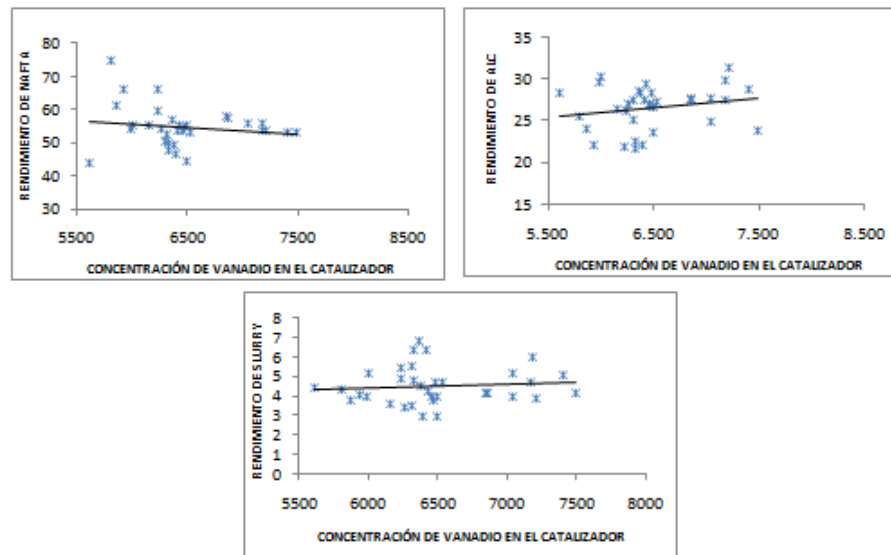
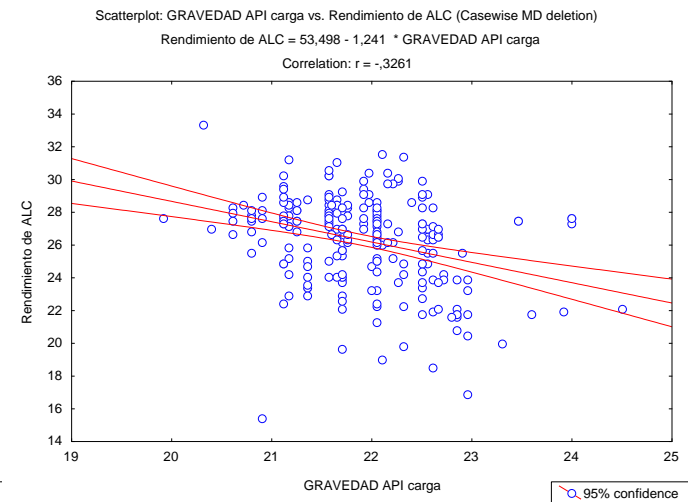
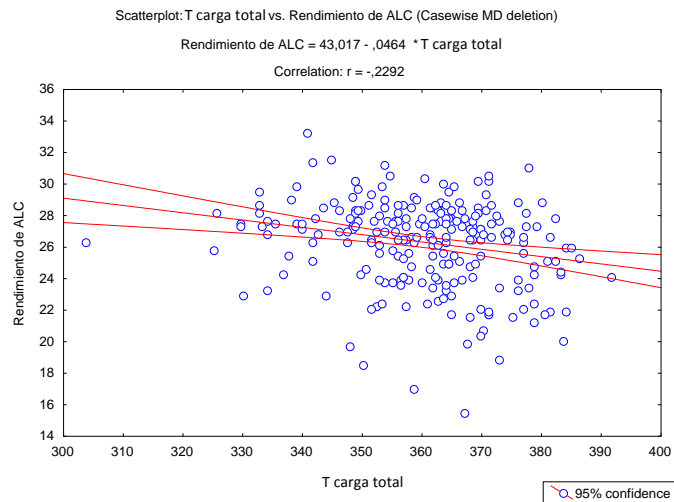
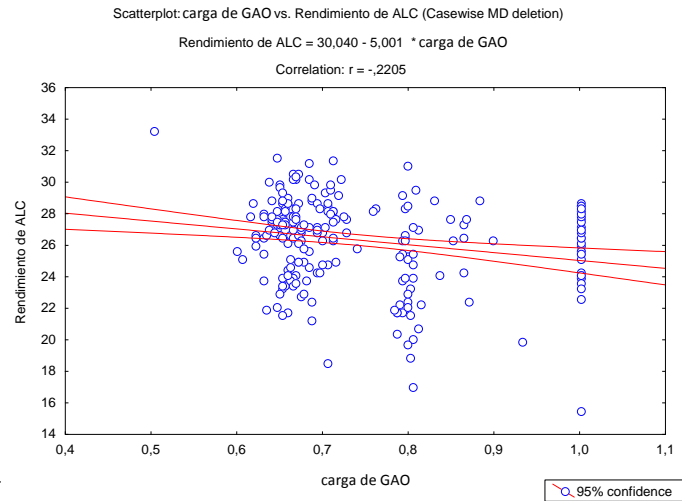
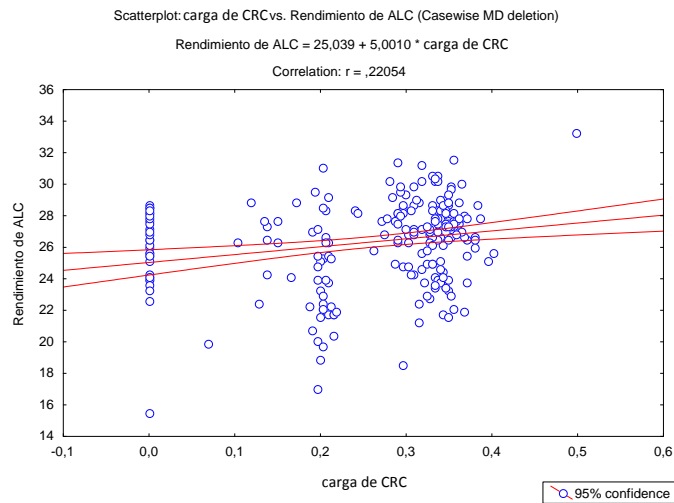
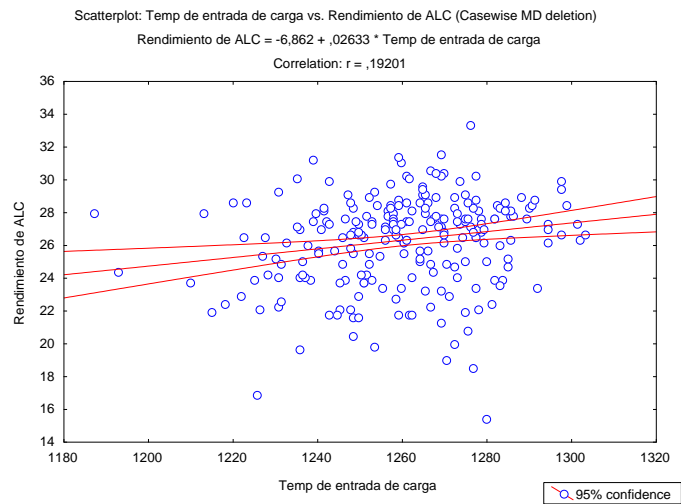
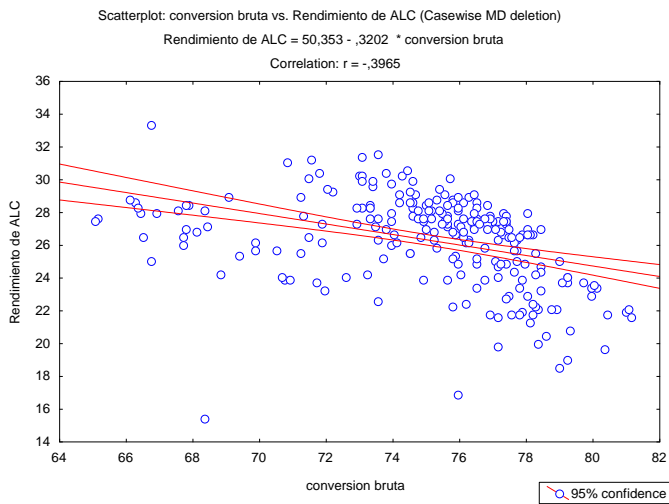
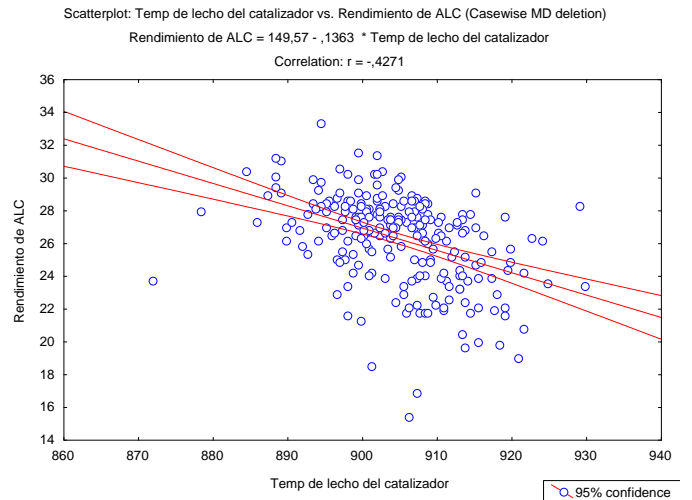
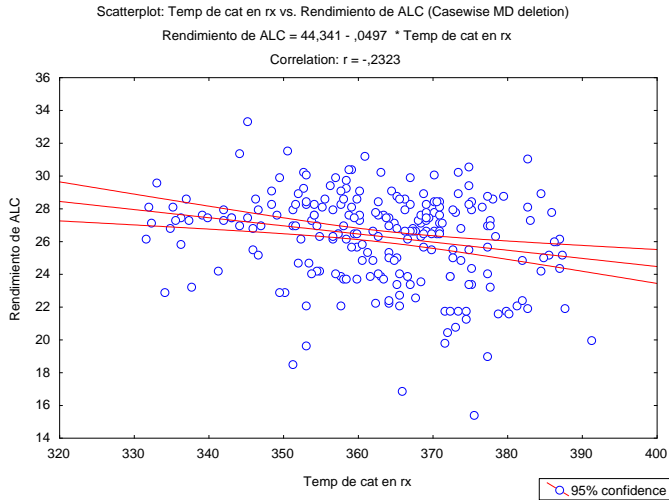


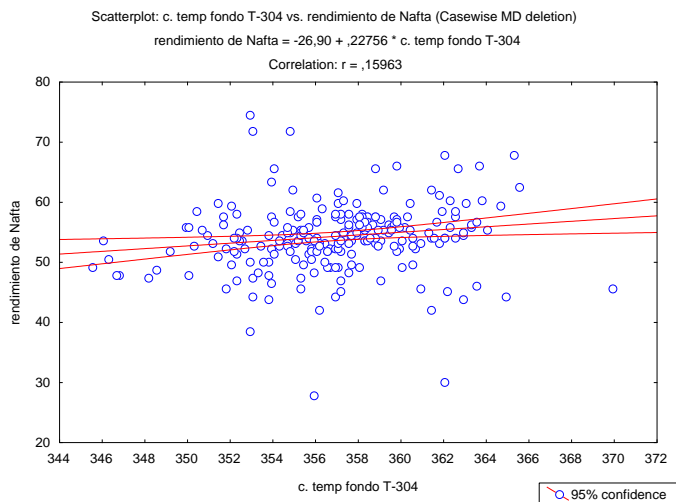
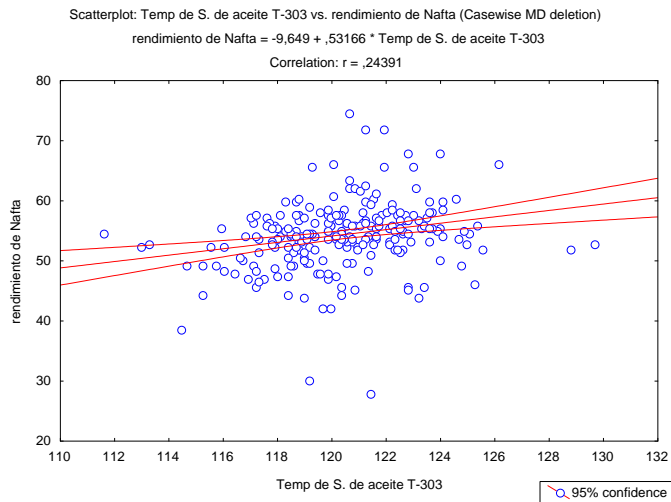
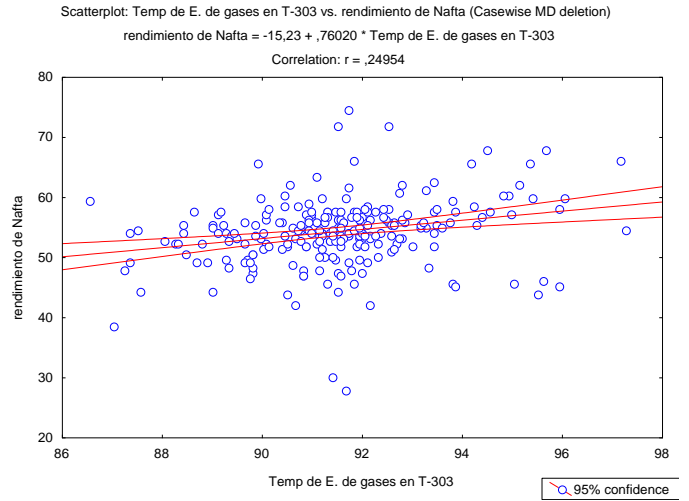
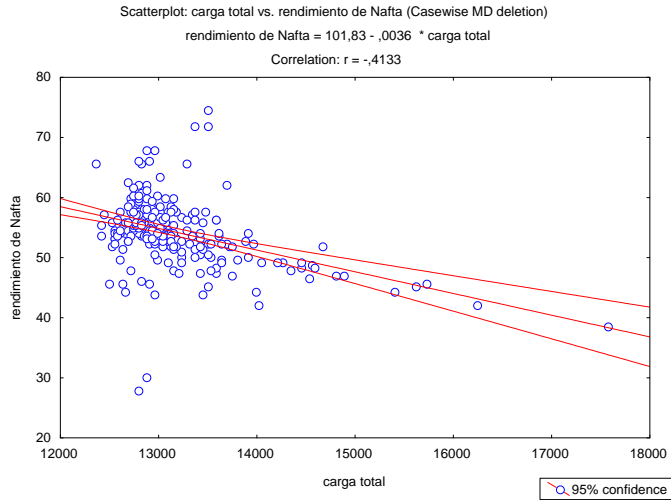
Imagen 3. CONCENTRACIÓN DE VANADIO SOBRE EL CATALIZADOR Vs LOS RENDIMIENTOS DE NAFTA, ALC Y SLURRY.

ANEXO 3. CORRELACIONES DEL RENDIMIENTO DE ALC CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.

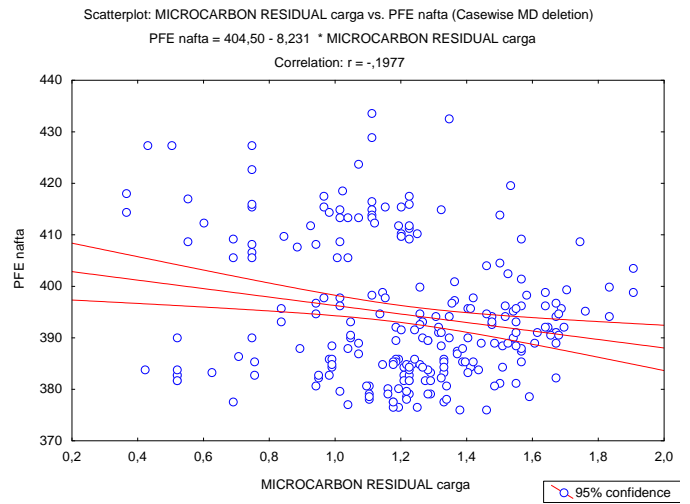
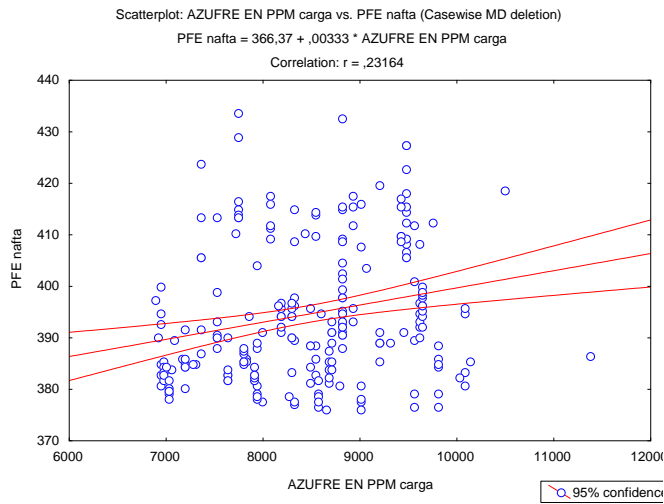
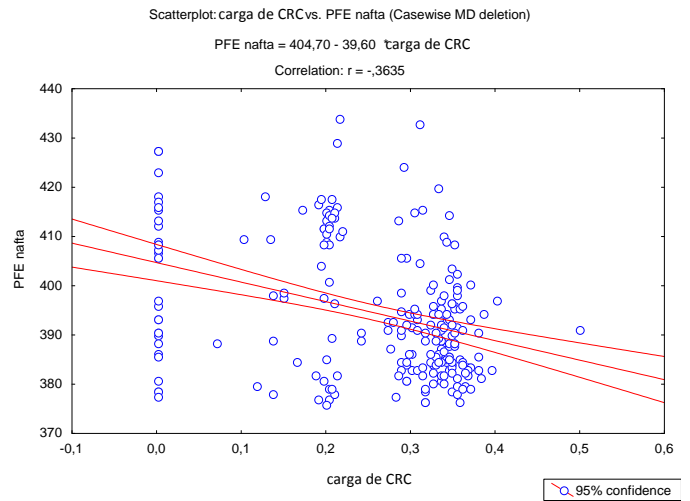
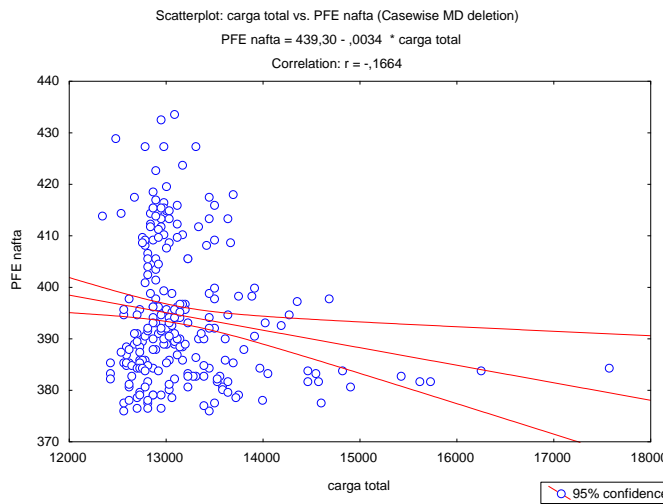


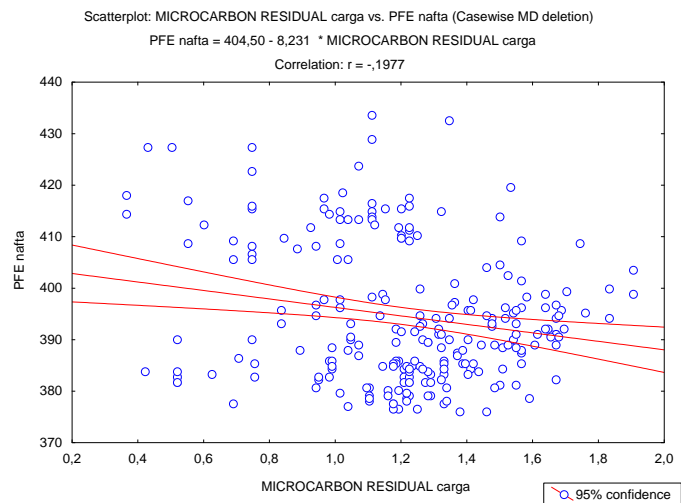
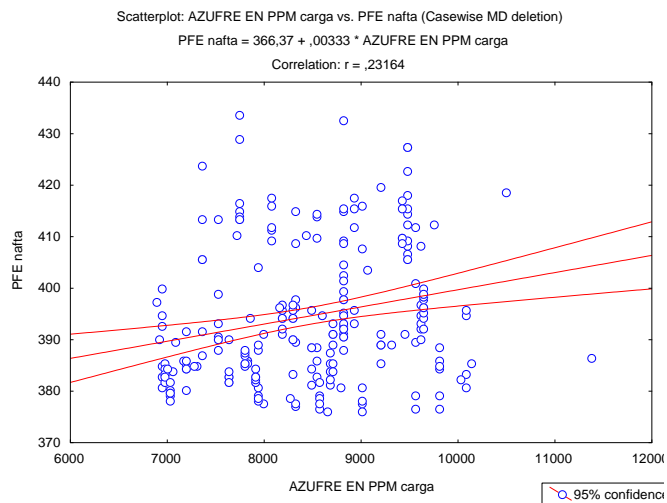
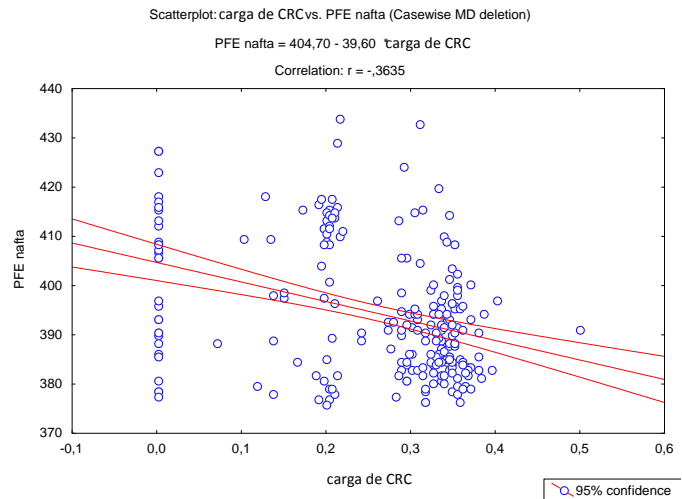
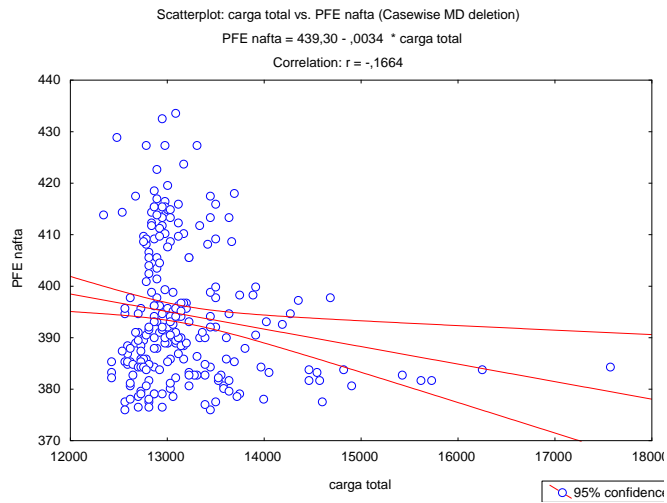


ANEXO 4. CORRELACIONES DEL RENDIMIENTO DE NAFTA CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.



ANEXO 5. CORRELACIONES DEL PFE CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO.





ANEXO 6. CORRELACIONES DEL RVP CON LAS VARIABLES PERTENECIENTES AL MODELO

