

**DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA  
VISCOSIDAD DE CRUDO MUERTO PARA CRUDOS EXTRAPESADOS  
APLICADO A UN CAMPO COLOMBIANO**

**VÍCTOR NICOLÁS ÁLVAREZ RUEDA  
HOLMAN YESID MORENO AFRICANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

**DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA  
VISCOSIDAD DE CRUDO MUERTO PARA CRUDOS EXTRAPESADOS  
APLICADO A UN CAMPO COLOMBIANO**

**VÍCTOR NICOLÁS ÁLVAREZ RUEDA  
HOLMAN YESID MORENO AFRICANO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director  
MSc. JOHN ALEXANDER LEON PABON  
Ing. de Petróleos**

**Co Director  
DIANA PATRICIA GUERRERO  
Ing. de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2015**

*En primer lugar quiero dedicar este gran trabajo al ser sin el cual nada hubiese sido posible: Dios gracias por brindarme la posibilidad de lograr una de mis primeras y más anheladas metas.*

*De manera especial quiero dedicar esta tesis a mis padres Luz Ángela Rueda y Víctor Álvarez por ser los principales artífices y fuente de inspiración para haber podido formarme y culminar mis estudios de pregrado, pues a Dios y a ellos todo les debo, los amo.*

*A mi hermana Melissa Álvarez y mis abuelos por regalarme ese apoyo incondicional durante toda mi carrera y sentirse orgullosos de estar donde estoy, los adoro.*

*También quiero dedicar esta tesis a mis madrinas Loydover Fajardo y Maritza Ávila por brindarme sus consejos, su apoyo y orientación cuando más lo necesito.*

*A esa maravillosa familia que Dios me ha regalado también quiero hacer su reconocimiento, porque sé que cada uno de ellos siempre aporta su granito de arena.*

*No podría faltar mencionar a todos mis amigos y compañeros que durante esta experiencia compartimos tantos y extraordinarios momentos, de manera especial a Holman Moreno mi compañero de tesis y excelente amigo durante toda la carrera y a ese grupo de compañeros que a pesar de todo siempre estuvimos unidos: Paola Santamaría, Lorena Valenzuela, Manuel Chaparro, Armando Muñoz, Camilo Quintana, Juan Carlos Bernal, Duván Castellanos, Arturo Rincón, Leder Santoyo, Steven Téllez, Javier Monsalve.*

**Nicolás**

*Han pasado cinco años y aún recuerdo como si fuese ayer el día en que lleno de muchas ilusiones me propuse ser profesional, con la gracia de Dios hoy puedo decir que aquello que era un sueño hoy es una realidad. Nada de esto hubiera sido posible sin la ayuda de mis seres queridos y de grandes personas que siempre han rodeado mi vida.*

*Por ello Primero dedicar este triunfo a mis padres; mi madre Rosalba, quien siempre ha sido para mí un ejemplo de verriquera y entereza en los momentos difíciles de la vida, con el amor de madre desde pequeño me educo y me enseñó el camino correcto para llegar a donde hoy en día estoy. Siempre me brindo esa fuerza y sabios consejos cuando me sentía sin ganas de seguir. A mi padre Tiberio que en cielo esta que siempre me brindo lo mejor y me enseñó a luchar por los sueños y a quien hoy puedo decir: "Padre te cumplí el sueño de ver a tu hijo profesional".*

*Este triunfo también es para mis hermanos Gloria, Luz Ángela, John Yader, Yamid, Nelsy y Jimmy; quienes más que hermanos son unos padres para mí; siempre me han brindado su apoyo y cariño incondicional en todos los momentos de mi vida, nunca me dejaron solo en esta travesía; estaré eternamente agradecido a ellos, tanto que no tendré como pagarles todo lo lindo que han hecho por mí, han sido un ejemplo para mí y un modelo a seguir.*

*A mi compañero de tesis Nicolás a quien conozco desde ya hace cinco años, quien es como un hermano para mí y con quien pudimos sacar adelante este trabajo de grado para satisfacción de los nuestros.*

*Finalmente dedicar este triunfo al señor Jesús y a la Santísima Virgen de Chiquinquirá, por iluminarme, bendecirme y guiarme por el buen sendero de la vida*

**Holman**

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo de grado agradecemos con sinceridad:

A **Nuestros Padres** por educarnos y guiarnos por el camino correcto para la consecución de las metas y sueños propuestos.

A la **Universidad Industrial de Santander**, por brindarnos la oportunidad de formarnos como excelentes profesionales en el aspecto académico y social.

**John Alexander León Pabón**, Ingeniero de Petróleos. Director de nuestro proyecto de grado, por confiar en nuestras capacidades y por brindarnos todos los medios posibles para que nuestro proyecto haya sido un todo un éxito.

A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a llevar este proyecto a buen puerto.

Finalmente queremos agradecer a **Dios** porque sin su bendición y presencia, este logro no hubiese sido posible.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>19</b>
<b>1. FUNDAMENTOS DE LA VISCOSIDAD Y LOS CRUDOS EXTRAPESADOS</b> .....	<b>21</b>
1.1 CRUDOS EXTRAPESADOS .....	21
1.2 CRUDO MUERTO .....	23
1.3 VISCOSIDAD DEL CRUDO .....	23
1.3.1 Viscosidad del Crudo Muerto .....	24
1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA VISCOSIDAD DEL CRUDO .....	24
1.4.1 Efecto de la Temperatura .....	24
1.4.2 Efecto de la Presión .....	25
1.4.3 Efecto del Gas en Solución .....	26
1.4.4 Efecto de la Densidad (Gravedad °API) .....	27
<b>2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MODELOS DE VISCOSIDAD PARA CRUDOS MUERTOS</b> .....	<b>29</b>
2.1 ANÁLISIS DE REGRESIÓN .....	29
2.1.1 Regresión Lineal Simple .....	30
2.1.2 Regresión Lineal Múltiple .....	31
2.1.3 Regresión no Lineal .....	31
2.1.4 Linealización de Modelos no Lineales .....	32
2.2 OPTIMIZACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN .....	32
2.2.1 Método de los Mínimos Cuadrados .....	33
2.3 CAPACIDAD PREDICTIVA DE UNA REGRESIÓN .....	35
2.3.1 Coeficiente de Determinación $R^2$ .....	35
2.4 TIPOS DE ERROR .....	35
2.4.1 Error Relativo $E_r$ (%) .....	35
2.4.2 Error Relativo Promedio, $E_{rp}$ (%) .....	36
2.4.3 Desviación Estándar .....	36
2.5 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN .....	36
2.5.1 Coeficiente de Correlación Múltiple $R$ .....	37
2.5.2 Coeficiente de Determinación Múltiple $R^2$ .....	38
2.6 MODELOS DE VISCOSIDAD PARA CRUDOS MUERTOS .....	39
2.6.1 CORRELACIÓN DE EGBOGAD, E.O. ....	39

2.6.2 CORRELACIÓN DE BEAL.....	40
2.6.3 CORRELACIÓN DE KARTOATMODJO, T Y SCHMIDT, Z.....	41
2.6.4 CORRELACIÓN DE VÁZQUEZ, M.E. Y BEGGS, H.D. ....	41
2.6.5 CORRELACIÓN DE GLASO, O.....	42
<b>3. DISEÑO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
3.1 SELECCIÓN DE LOS FACTORES.....	43
3.1.1 Niveles de los Factores.....	44
3.1.2 Variables de Bloqueo .....	45
3.1.3 Variables Dependientes .....	46
3.2 TIPO DE DISEÑO EXPERIMENTAL .....	46
3.2.1 Fase Experimental .....	47
3.3 MATERIALES .....	50
<b>4. PRUEBAS DE LABORATORIO.....</b>	<b>54</b>
4.1 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA .....	54
4.1.1 Equipos, Elementos y Reactivos.....	56
4.1.2 Procedimiento .....	57
4.1.3 Cálculos .....	69
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
5.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS .....	76
5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE .....	78
5.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA GRAVEDAD °API PARA CADA UNA DE LAS TEMPERATURAS .....	78
5.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA CADA GRAVEDAD °API.....	79
5.5 DETERMINACIÓN DE NUEVAS SERIES DE DATOS .....	82
<b>6. GENERACIÓN DE LA CORRELACIÓN .....</b>	<b>85</b>
6.1 AJUSTE PARA NUEVAS SERIES DE DATOS .....	85
6.2 DETERMINACIÓN DE MODELOS DE CORRELACIÓN .....	85
6.3 VALIDACIÓN DE MODELOS DE CORRELACIÓN PROPUESTOS .....	86_Toc408992824
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>8. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>98</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Clasificación de los crudos pesados	22
Figura 2: Efecto de la temperatura en la viscosidad	25
Figura 3: Viscosidad del petróleo en función de la presión	26
Figura 4: Efecto de la presión y gas en solución en la viscosidad	27
Figura 5: Efecto de la densidad (gravedad °API)	28
Figura 6: Recta óptima obtenida por el método de mínimos cuadrados	34
Figura 7: Diseño experimental	47
Figura 8: Toma de muestra en campo	53
Figura 9: Frasco de recolección de muestras	58
Figura 10: Recolección de la muestra de petróleo	58
Figura 11: Etiqueta	59
Figura 12: Muestra sin burbujas	59
Figura 13: Cápsulas o portamuestra	60
Figura 14: Husillos	60
Figura 15: Preparación del equipo para realizar la prueba	61
Figura 16: Temperatura de prueba	62
Figura 17: Velocidad RPM	62
Figura 18: Homogenización de la muestra con a temperatura	63
Figura 19: Programación del torque (>15% y <95%)	63
Figura 20: Menú principal	64
Figura 21: Programación de salida de datos	64
Figura 22: Programación de la toma de datos de la prueba	64

Figura 23: Programación de los step	65
Figura 24: Finalización de la prueba	66
Figura 25: Comportamiento velocidad vs. viscosidad	70
Figura 26: Gradiente de velocidad vs. esfuerzo de corte	71
Figura 27: Comportamiento de la viscosidad en función de la gravedad °API a tres diferentes temperaturas	80
Figura 28: Curva exponencial ajustada de viscosidad vs temperatura @gravedad °API=7,7	81
Figura 29: Superposición de nuevas series de datos	84
Figura 30: Ajuste comportamiento de la viscosidad en función de la gravedad °API a diferentes temperaturas	89

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Análisis de factores	44
Tabla 2: Niveles de los factores	44
Tabla 3: Variables de bloqueo	45
Tabla 4: Análisis de la matriz	48
Tabla 5: Matriz de pruebas de laboratorio	49
Tabla 6: Instrumentos y equipos de laboratorio	50
Tabla 7: Volumen sustancias requeridas	51
Tabla 8: Propiedades del crudo	52
Tabla 9: Tipos de husillos	55
Tabla 10: Ejemplo, reporte de resultados	67
Tabla 11: Ejemplo, resultados promedio de cada step	69
Tabla 12: Ejemplo, cálculo de la viscosidad para muestra de crudo con gravedad $^{\circ}\text{API}=7,7$	72
Tabla 13: Consolidado de los resultados de pruebas de laboratorio	74
Tabla 14: Comportamiento viscosidad a partir de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio	76
Tabla 15: Conjunto de datos seleccionados	77
Tabla 16: Análisis estadístico de regresión lineal múltiple	78
Tabla 17: Datos para graficar curva de tendencia	79
Tabla 18: Valores de viscosidad y temperatura obtenidos por ecuación de la curva @gravedad $^{\circ}\text{API}=7,7$	82
Tabla 19: Series de datos para generar la correlación	83

Tabla 20: Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje de error absoluto promedio 87

Tabla 21: Rangos de aplicación de la figura 30 90

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Reportes de resultados y cálculos a partir de pruebas de laboratorio	99
Anexo B. Información complementaria para obtener nuevas series de datos	116
Anexo C. Información complementaria para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio	121

## RESUMEN

**TÍTULO: DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE CRUDO MUERTO PARA CRUDOS EXTRAPESADOS APLICADO A UN CAMPO COLOMBIANO\***

**AUTORES: VÍCTOR NICOLÁS ÁLVAREZ RUEDA  
HOLMAN YESID MORENO AFRICANO\*\***

**PALABRAS CLAVE:** Viscosidad, Crudo muerto, Crudo extrapesado, Modelos de viscosidad, Diseño experimental, Pruebas de laboratorio, Análisis estadístico, Análisis de regresión, Ajuste de curvas, Modelos de correlación de viscosidad.

Actualmente, los crudos extrapesados, en el mundo y especialmente en América Latina y Estados Unidos se han vuelto muy importantes para su economía debido a la dificultad que se tiene de encontrar yacimientos de crudos convencionales; sin embargo, el contexto en el que se encuentra la industria petrolera no es el mejor, ya que últimamente los precios del crudo no son tan favorables pero cabe destacar que con los avances tecnológicos que se han tenido en cuanto a perforación, completamiento, y sobre todo en producción han hecho que expertos en el tema aseguren que mientras no mejore ésta situación, de igual manera, la mayoría de yacimientos con este tipo de crudos seguirán siendo activos rentables.

Los crudos extrapesados se caracterizan principalmente por presentar altas viscosidades generando así dificultades en su producción, tratamiento y transporte; por tanto, en el momento en el cuál se decide explotar un yacimiento de crudo extrapesado, uno de los retos al que se ven enfrentados las compañías petroleras, es el de conocer un estimado del valor de la viscosidad del crudo muerto, ya que así podrán diseñar estrategias de producción y transporte para dichos crudos.

Es por ello que surge esta investigación, que permite a través del conocimiento de propiedades como gravedad API y temperatura y usando la estadística como herramienta principal, conocer un valor estimado de la viscosidad para unas condiciones con rangos específicos de aplicación de un crudo muerto extrapesado a partir de un modelo de correlación generado para éste tipo de crudos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. MSc. John Alexander León Pabón. Codirector. Ingeniero Diana Patricia Guerrero.

## ABSTRACT

**TITLE: DETERMINATION OF A CORRELATION FOR CALCULATING OF DEAD OIL VISCOSITY FOR EXTRA HEAVY OIL APPLIED COLOMBIAN FIELD\***

**AUTHORS: VÍCTOR NICOLÁS ÁLVAREZ RUEDA  
HOLMAN YESID MORENO AFRICANO\*\***

**KEYWORDS:** Viscosity, Dead oil, extra heavy oil, Viscosity models, Experimental design, Lab tests, Statistical analysis, Regression analysis, Curve fitting, Correlation viscosity models.

Currently, extra-heavy crude in the world and especially in Latin America and the United States have become very important to its economy due to the difficulty you have to find deposits of conventional crude; however, the context in which the oil industry is not the best, because while oil prices are not as favorable but note that with technological advances that have been taken in terms of drilling, completion, and all in production have led experts in the field to ensure that while not improve this situation, likewise, most sites with this type of crude remain profitable assets.

The extra-heavy crude is mainly characterized by high viscosities generating difficulties in their production, processing and transportation; therefore, the time which is decided exploit a deposit of heavy crude, one of the challenges they are facing the oil companies is to make an estimate of the value of the viscosity of dead oil, as this may design strategies of production and transportation for such raw.

That is why this research, which allows through knowledge of properties such as API gravity and temperature and using statistics as a primary tool arises, make an estimated value of viscosity conditions with specific ranges of application of a dead extra-heavy crude to from a correlation model generated for this type of crude.

---

\* Thesis

\*\* Physicochemical Faculty. Petroleum Engineering School. Director. John Alexander León Pabón Master of Science. Codirector. Diana Patricia Guerrero Petroleum Engineer.

## INTRODUCCIÓN

Es un hecho que las reservas de crudo convencional se están agotando, es por ello que los yacimientos de crudos extrapesados han pasado a tener un papel protagónico en la industria petrolera; sin embargo, últimamente los precios del crudo no son tan favorables pero con los avances tecnológicos en cuanto a perforación, completamiento, producción y estimulación han hecho que expertos en el tema aseguren que sino mejora éste contexto, de igual manera, la mayoría de yacimientos con este tipo de crudos seguirán siendo activos rentables.

Los crudos extrapesados, en el mundo y especialmente en América Latina se han vuelto muy importantes en la economía de los países debido a la dificultad de encontrar yacimientos de crudos convencionales. Dichos crudos presentan retos en cuanto a su exploración, producción, transporte y por tanto a su rentabilidad debido a su alta viscosidad que varía en función de características de cada yacimiento; dentro de estos yacimientos se encuentran los pertenecientes a la formación San Fernando en Colombia, La Faja del Orinoco en Venezuela, entre otros yacimientos ubicados en Estados Unidos y Canadá.

Cuando se decide explotar un yacimiento de crudo extrapesado, uno de los retos al que se ven enfrentados las compañías petroleras, es el de conocer un estimado del valor de la viscosidad del crudo muerto, ya que así podrá diseñar estrategias de producción y transporte para dichos crudos. Sin embargo en ocasiones no siempre se tiene la posibilidad de realizar muestreos de campo que permitan obtener el valor de esta variable en laboratorio, es ahí cuando aparecen correlaciones empíricas que permiten a través de la estadística generar un valor estimado de dicha propiedad.

Es por ello que surge esta investigación, que permite a través del conocimiento de propiedades como gravedad API y temperatura, conocer un valor estimado

de la viscosidad de un crudo muerto extrapesado. Para la obtención de dicha correlación el primer paso a realizar será obtener las muestras de campo de varios pozos con diferentes gravedades °API para determinar mediante pruebas de laboratorio la viscosidad del crudo muerto a diferentes temperaturas; luego de realizar dichas pruebas, se analiza cómo se comporta la viscosidad bajo diferentes condiciones de temperatura y gravedad API con el propósito de establecer una preparación de los datos y escoger aquellos que mejor representen el comportamiento típico que debe tener la viscosidad en función de éstas dos variables.

Finalmente, teniendo los datos que mejor se ajustan al comportamiento buscado, por medio de la estadística y la herramienta-complemento *Solver* del software *Microsoft Excel 2013*, se genera un modelo final denominado correlación que permita calcular la viscosidad de crudos muertos para crudos extrapesados a diferentes temperaturas y gravedades °API con cierto grado de confiabilidad y para unas condiciones con rangos específicos.

# 1. FUNDAMENTOS DE LA VISCOSIDAD Y LOS CRUDOS EXTRAPESADOS

## 1.1 CRUDOS EXTRAPESADOS

En la industria petrolera, la clasificación de los diferentes tipos de hidrocarburos está basada fundamentalmente en dos propiedades como lo son la viscosidad y la gravedad API (función de la densidad del crudo); Sin embargo para dicha clasificación, la gravedad API es una propiedad que ofrece un rango más definido ya que ambas propiedades varían con la temperatura, pero la viscosidad lo hace en gran medida mientras que la gravedad API varía poco.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos caracteriza los crudos pesados con base en su densidad o gravedad específica expresada mediante grados API. En esta escala, se consideran crudos extrapesados aquellos que oscilan en el rango 7,0 - 9,0 °API (presentan una densidad mayor que la del agua)<sup>1</sup>. La composición de éstos crudos se encuentra relacionada mayoritariamente por asfáltenos, los cuales poseen un alto peso molecular y por general se encuentran rodeados de partículas de metales como el vanadio, níquel, azufre entre otros; por tanto, dicha composición la principal responsable que los crudos extrapesados presenten propiedades de viscosidad y densidad muy altas.

Por otra parte, una clasificación de los crudos pesados-extrapesados, en función de su capacidad a fluir a condiciones de yacimiento, según Guarín<sup>2</sup>:

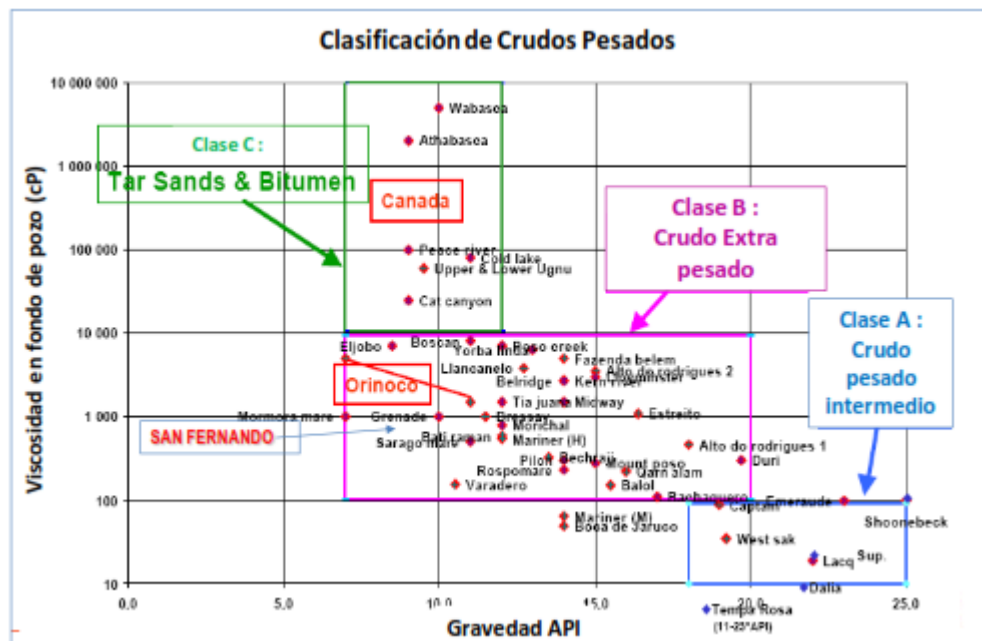
---

<sup>1</sup> TREVIÑO, MANUEL. Futuro Pesado [en línea]. Carta petrolera. Edición 114. ECOPETROL. Abril 2006.

<sup>2</sup> GUARIN ARENAS, FLAMINIO. Determinación de un modelo de relación de influjo de producción (IPR) para crudos extra pesados con movilidad. Caso formación San Fernando.

- **Clase A** denominada Crudo Pesado Intermedio. Esta denominación abarca a los hidrocarburos que a condiciones de yacimiento presentan una viscosidad menor a 100 cp y una densidad API entre 10 y 23 °API.
- **Clase B** denominada Crudo Extrapesado. Para crudos que se encuentren en un rango de viscosidad entre 100 y 10.000 cp. Y una gravedad API entre 7,0 y 9,0 °API.
- **Clase C** denominada Bitumen o Arena Bituminosa. Se denomina de esta manera a los hidrocarburos líquidos que a condiciones de yacimiento son inmóviles. Estos hidrocarburos se encuentran en rangos de viscosidad mayores a los 10.000 cp y densidades API menores a 7,0 °API

**Figura 1:** Clasificación de los crudos pesados



**Fuente:** GUARIN ARENAS, Flaminio. Determinación de un modelo de relación de influjo de producción (IPR) para crudos extra pesados con movilidad. Caso formación San Fernando. Bucaramanga, 2011, 22 p.

## 1.2 CRUDO MUERTO

Es un Crudo que debido a condiciones de presión y temperatura no tiene gas en solución, debido a esto dichos crudos no liberan gas a presión atmosférica y temperatura ambiente.

## 1.3 VISCOSIDAD DEL CRUDO

Se define como la medida de la resistencia del crudo a fluir. Es usualmente medida en centipoises, cp, (gr/cm\*seg). La resistencia al flujo es causada por fricción interna generada cuando las moléculas del fluido tratan de desplazarse unas sobre otras.

Los valores de viscosidad se requieren a diferentes presiones, tanto en Ingeniería de yacimientos como en Ingeniería de Producción. Si se dispone de un análisis PVT las medidas de la viscosidad se reportan a la presión y temperatura del yacimiento y a diferentes presiones. No obstante, a medida que el fluido fluye a superficie su temperatura disminuye, lo que involucra la necesidad de corregir la viscosidad para cambios de temperatura, mediante correlaciones empíricas. Los principales factores de interés en Ingeniería de Petróleos que afectan la viscosidad son: La composición del petróleo, la temperatura, el gas disuelto y la presión. La viscosidad aumenta cuando disminuye la API y también aumenta con un decremento en la temperatura. El efecto del gas disuelto es aliviar el petróleo y por tanto disminuir su viscosidad. Mientras exista un incremento en la presión sobre un petróleo subsaturado, su viscosidad se incrementa<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> ESCOBAR, FREDY. Fundamentos de ingeniería de yacimientos. Neiva: Editorial Universidad Surcolombiana (2002)

### **1.3.1 Viscosidad del Crudo Muerto**

La viscosidad de petróleo muerto (sin gas en solución) es definida como la viscosidad del crudo a presión atmosférica y a la temperatura del sistema. La característica fundamental es que este valor expresa la resistencia al flujo de los crudos sin gas en solución<sup>4</sup>.

## **1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA VISCOSIDAD DEL CRUDO**

### **1.4.1 Efecto de la Temperatura**

La viscosidad del petróleo decrece con el incremento de la temperatura; esto es generalmente atribuido por el aumento de la distancia entre las moléculas originado por la expansión térmica del líquido.

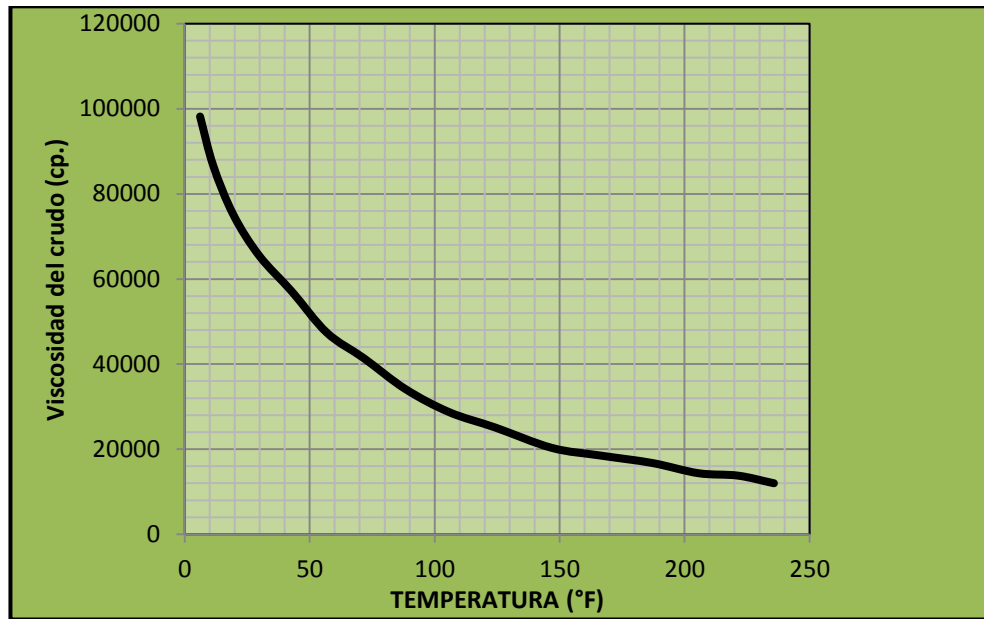
El propósito de aumentar la temperatura del crudo es disminuir su viscosidad mediante el incremento de la velocidad de las moléculas y, por ende, la disminución de sus fuerzas de cohesión y resistencia molecular interna al desplazamiento.

La disminución de la temperatura genera un aumento en la viscosidad del petróleo, por ende, son inversamente proporcionales.

---

<sup>4</sup> PINO G. CARLO, PERTUZ MAURICIO. Ajuste de modelos de viscosidad de crudo vivo para crudos extrapesados. UIS. Pag 24, Bucaramanga(2013)

**Figura 2:** Efecto de la temperatura en la viscosidad

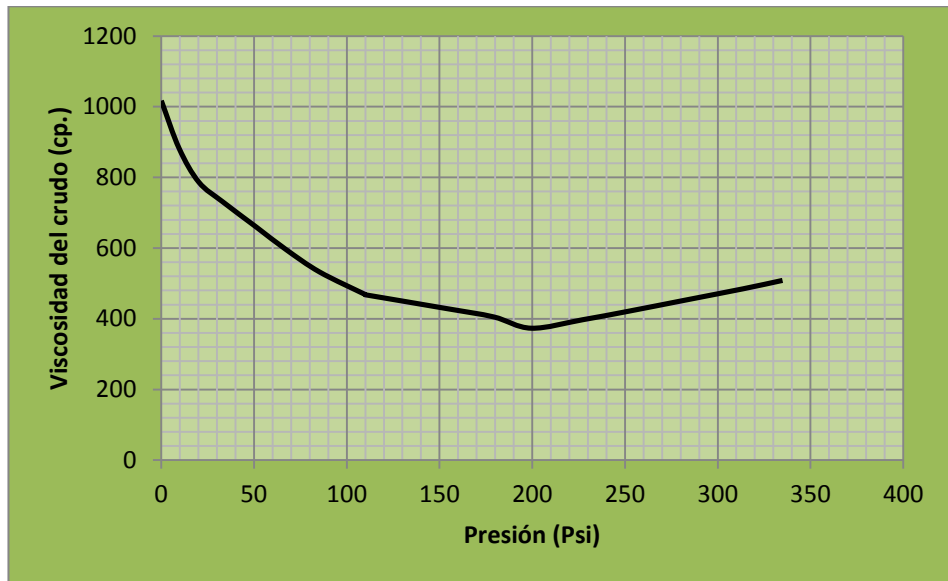


**Fuente:** Autores del Proyecto.

#### 1.4.2 Efecto de la Presión

Generalmente la viscosidad del líquido incrementa con el aumento de la presión encima de la presión de burbujeo; este comportamiento obedece a que disminuye las distancias entre las moléculas y en consecuencia aumenta la resistencia de las moléculas a desplazarse. Por debajo de la presión de burbujeo, ambos gas y líquido están presentes y un incremento en la presión origina que los componentes gaseosos ligeros presentes entren a la fase líquida, disminuyendo la viscosidad del líquido

**Figura 3:** Viscosidad del petróleo en función de la presión



**Fuente:** Autores del Proyecto

### 1.4.3 Efecto del Gas en Solución

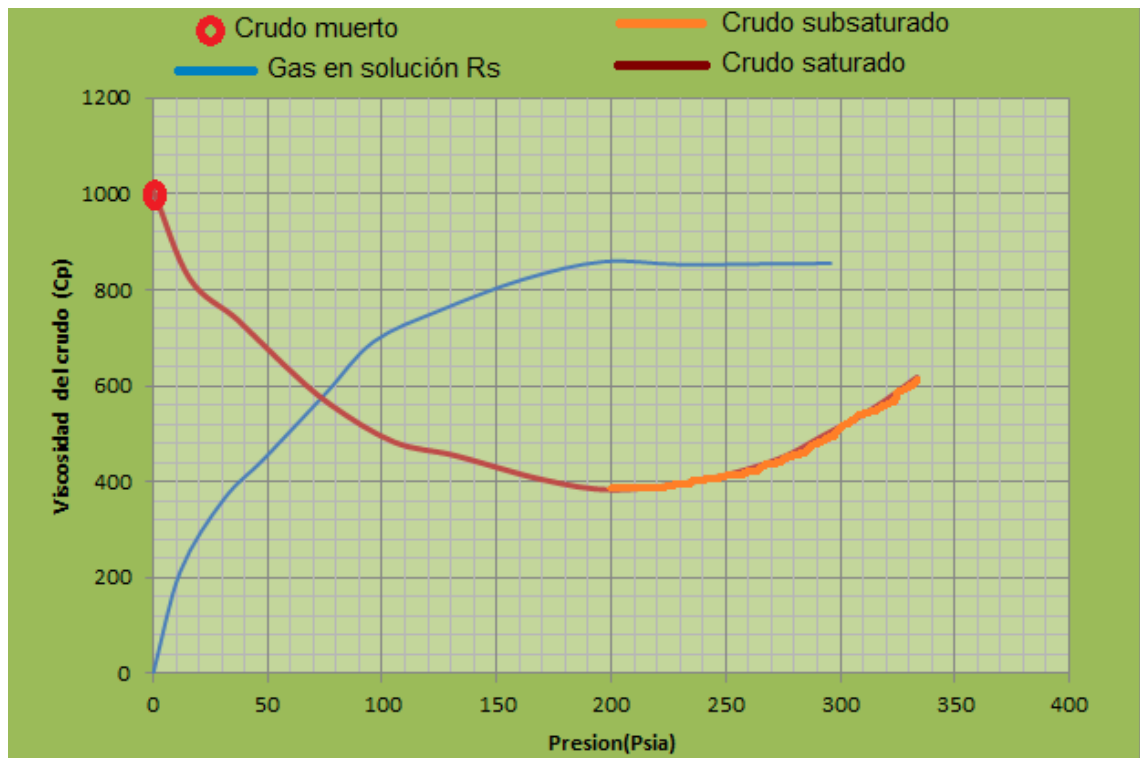
El aumento del gas en solución en el crudo a temperatura constante reduce su viscosidad. La reducción se produce porque las moléculas relativamente pequeñas de los componentes del gas pasan a formar parte de la configuración molecular y aumentan la separación intermolecular entre las moléculas complejas de la fase líquida, lo cual reduce la resistencia al movimiento.

Si no hay cambio en la cantidad de gas en solución cuando se varía la presión sobre un crudo, el principal efecto en la variación de la viscosidad es debido a la compresión del líquido. Esto se presenta cuando el aceite se encuentra por encima de la presión de burbuja<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> ORIANA, Factores que afectan la viscosidad. Buenas tareas (2011)

**Figura 4:** Efecto de la presión y gas en solución en la viscosidad

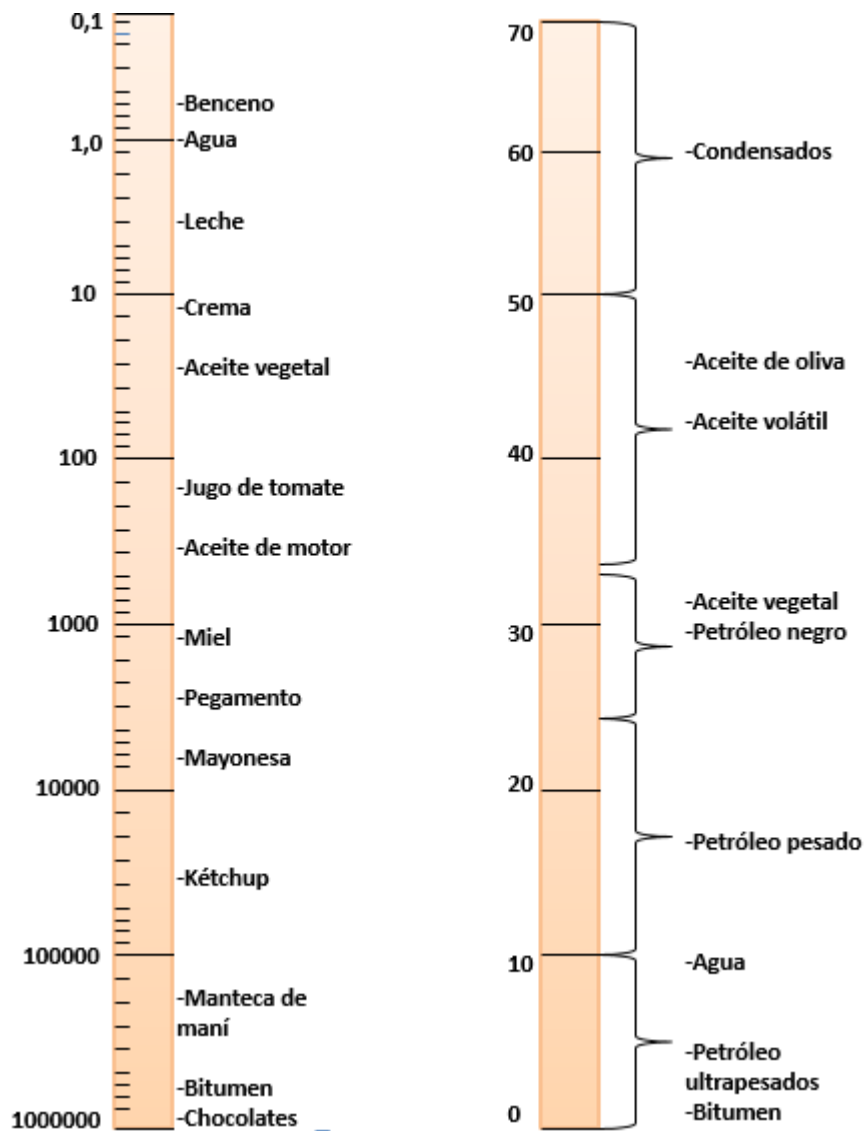


**Fuente:** Autores del Proyecto.

#### 1.4.4 Efecto de la Densidad (Gravedad °API)

En la figura 5 se observa el comportamiento que tiene la viscosidad en general de los líquidos incluyendo el petróleo en función de su densidad (gravedad °API), permitiendo con esto establecer que dicho comportamiento es propio de una relación inversamente proporcional.

**Figura 5:** Efecto de la densidad (gravedad °API)



**Fuente:** Yacimientos de petróleo pesado, Oilfield Review, Schlumberger. Artículo publicado 2003.

## 2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MODELOS DE VISCOSIDAD PARA CRUDOS MUERTOS

En ocasiones, resulta necesario extraer conclusiones válidas respecto a un grupo grande de individuos, objetos, variables etc. El análisis estadístico o también conocido como estadística inferencial, se basa en la teoría de probabilidades para generalizar los rasgos de un grupo a partir de las características de una muestra representativa, es decir, utiliza estadísticas muestrales para obtener conclusiones preferiblemente con el mayor grado de aproximación sobre los verdaderos parámetros de dicho grupo.

### 2.1 ANÁLISIS DE REGRESIÓN

El término regresión fue introducido por Francis Galton en 1889. Su trabajo se centró en la descripción de los rasgos físicos de los descendientes (variable A) a partir de sus padres (variable B)<sup>6</sup>. El análisis de regresión consiste en emplear métodos que nos permitan determinar la relación funcional entre las variables en estudio; de forma tal que nos permita predecir el valor de una variable utilizando los valores que correspondan a las otras variables<sup>7</sup>.

Generalmente, para la elección de una relación funcional particular que represente la población bajo investigación, se debe realizar:

- Una consideración analítica del fenómeno que nos ocupa.
- Un examen de diagramas de dispersión.

Posteriormente, Una vez se define el tipo de función matemática que mejor se ajusta o que mejor representa nuestro concepto de la relación exacta que existe entre las variables, se procede a elegir una expresión particular de esta

---

<sup>6</sup> GALTON, F. Natural Inheritance. London: Mcmillan & Co. 1889.

<sup>7</sup> Machicao, Nilton H. Estadística aplicada. Universidad tecnológica del Peru. Lima.

familia de funciones; es decir, se ha escogido una función como término del verdadero estado en la población y ahora es necesario estimar los parámetros de esta función mediante el ajuste de curvas.

Los parámetros no se pueden determinar sin errores, ya que los valores observados de la variable dependiente no coinciden con los esperados, por esto, la ecuación general, en términos estadísticos, sería:

$$Y = f(X_1, \dots, X_n; \theta_1, \dots, \theta_m) + \varepsilon \quad \text{Ecuación ( 1 )}$$

Dónde:

Y : Variable dependiente.

X<sub>i</sub> : La i-ésima variable independiente (i=1, ..., n).

θ<sub>j</sub> : El j-ésimo parámetro en la función (j=1, ..., m).

ε : Error cometido en el intento de observar la característica en estudio.

Para realizar el análisis de regresión y desarrollar tal procedimiento, existen algunas de las siguientes:

### **2.1.1 Regresión Lineal Simple**

De modo general, se dice que existe regresión de los valores de una variable con respecto a los de otra, cuando hay alguna línea, llamada línea de regresión, que se ajusta más o menos a una nube de puntos. Si existe regresión, a la ecuación que nos describe la relación entre las dos variables se denomina ecuación de regresión.

La ecuación será de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \varepsilon \quad \text{Ecuación (2)}$$

### 2.1.2 Regresión Lineal Múltiple

Una extensión útil de la regresión lineal es el caso en el que  $Y$  es una función lineal de dos o más variables independientes. Constantemente en la práctica de la investigación estadística, se encuentran variables que de alguna manera están relacionadas entre sí, por lo que es posible que una de las variables pueda relacionarse matemáticamente en función de otra u otras. La ecuación que describe este modelo es:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \varepsilon \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde  $\varepsilon$  corresponde al error del valor estimado  $Y_i$

### 2.1.3 Regresión no Lineal

Hay muchos casos en la ingeniería donde los modelos no lineales deben ajustarse a datos. En este contexto, tales modelos se definen como aquellos que tienen dependencia no lineal de sus parámetros.

Por ejemplo:

$$Y_i = \beta_0(1 - e^{-aX}) + \varepsilon \quad \text{Ecuación (4)}$$

En la regresión no lineal se pretende, como mínimo, obtener los valores de los parámetros asociados con la mejor curva de ajuste (habitualmente con el método de los mínimos cuadrados). Con el fin de determinar si el modelo es adecuado, puede ser necesario utilizar conceptos de inferencia estadística tales como intervalos de confianza para los parámetros, así como pruebas de bondad de ajuste.

#### 2.1.4 Linealización de Modelos no Lineales

La regresión lineal ofrece una poderosa técnica para ajustar una mejor línea a los datos. Sin embargo, se considera el hecho de que la relación entre las variables dependientes e independientes es lineal. Este no es siempre el caso, y el primer paso en cualquier análisis de regresión deberá ser graficar e inspeccionar los datos en forma visual, para asegurarnos que sea posible usar un modelo lineal. En algunos casos se pueden utilizar transformaciones para expresar los datos en una forma que sea compatible con la regresión lineal.

Un ejemplo es el modelo exponencial:

$$Y = ae^{bx} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Aplicando logaritmo a ambos lados de la ecuación se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln(Y) = \ln(a) + bx \quad \text{Ecuación (6)}$$

Lo cual sugiere una estimación de los parámetros desconocidos a través de un modelo de regresión lineal de  $\ln(y)$  con respecto a  $x$ , un cálculo que no requiere procedimientos de optimización iterativa. De todas formas, la linealización debe usarse con cuidado ya que la influencia de los datos en el modelo cambia; así como la estructura del error del modelo y la interpretación e inferencia de los resultados.

## 2.2 OPTIMIZACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN

Cuando se usa una estimación puntual, aunque el método de estimación utilizado sea bueno, es prácticamente improbable que el valor de la estimación coincida con el verdadero valor del parámetro, así que en estos casos se hace

conveniente acompañar la estimación con alguna medida que permita expresar la cercanía del estimador al parámetro.

Los métodos más conocidos de evaluación de estimaciones puntuales son:

- Método de los momentos.
- Método de la máxima verosimilitud.
- Método de los mínimos cuadrados
- Interpolación y/o Extrapolación

El método de los mínimos cuadrados es el más ampliamente conocido y utilizado en la estimación estadística de datos<sup>8</sup>.

### **2.2.1 Método de los Mínimos Cuadrados**

Es una técnica de análisis numérico encuadrada dentro de la optimización matemática, en la que dados un conjunto de pares (o ternas, etc.), se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos (un “mejor ajuste”), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático.

Desde un punto de vista estadístico, un requisito implícito para que funcione el método de mínimos cuadrados es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria. El teorema de Gauss-Markov prueba que los estimadores mínimos cuadráticos carecen de sesgo y que el muestreo de datos no tiene que ajustarse, por ejemplo, a una distribución normal. También es importante que los datos recogidos estén bien escogidos, para que permitan visibilidad en las variables que han de ser resueltas.

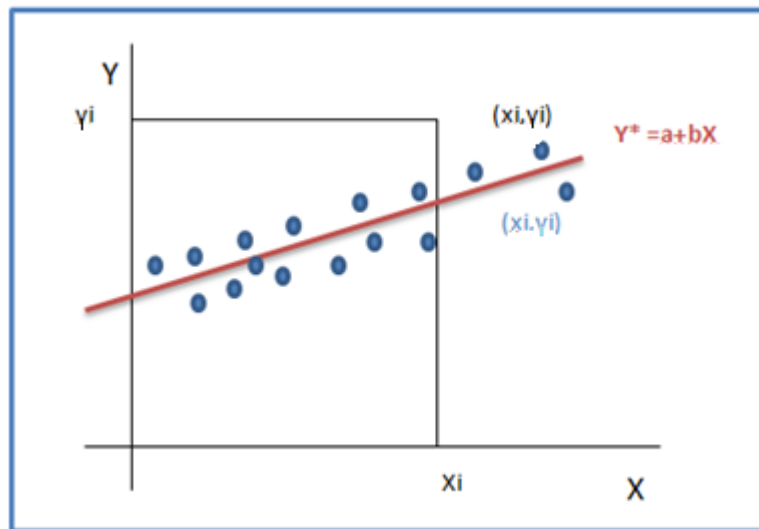
La técnica de mínimos cuadrados se usa comúnmente en el ajuste de curvas y/o datos observados. Si se tiene una dispersión de datos se puede observar que es posible trazar diferentes opciones de recta que satisfagan estos datos<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> PINO G. CARLO, PERTUZ MAURICIO, op. cit., p.31.

El objetivo final de esta metodología es buscar y establecer una recta que pase lo más cerca posible de los datos en cuestión usando técnicas de optimización. La función que representa dicho objetivo, se define como el mínimo valor de la suma de los cuadrados de las distancias verticales de cada uno de los puntos respecto a la recta óptima (Ver figura 6).

**Figura 6:** Recta óptima obtenida por el método de mínimos cuadrados



**Fuente:** Autores del Proyecto.

Matemáticamente se busca minimizar los valores de la diferencia entre la recta óptima  $Y^1$  y los datos experimentales  $Y$ , de tal manera que la sumatoria de todos los valores  $Y_i^1$  menos los valores  $Y_i$  se acerquen a un valor mínimo.

La siguiente ecuación representa lo anteriormente expuesto:

$$\sum_{i=1}^n Y_i^1 - Y_i^2 = \min \quad \text{Ecuación (7)}$$

---

<sup>9</sup> UNAD, Regresión por mínimos cuadrados. Datateca UNAD.

## 2.3 CAPACIDAD PREDICTIVA DE UNA REGRESIÓN

El proceso para evaluar la capacidad predictiva de una regresión, se lleva a cabo mediante el análisis de una serie de medidas estadísticas; las cuales permiten describir, analizar e interpretar ciertas particularidades de la muestra que se ha tomado como base para el desarrollo de una regresión.

### 2.3.1 Coeficiente de Determinación $R^2$

Mide la proporción de la variación total que es explicada por un modelo de regresión. El coeficiente de determinación se usa como un indicador del grado de bondad de ajuste, de un modelo de regresión, es decir, si el modelo proporciona una buena explicación del comportamiento de la variable en estudio o variable dependiente. Si se tiene un  $R^2 = 0.8$ , indica que el 80% de la variabilidad en la variable dependiente se explica por la variación de la variable o variables independientes<sup>10</sup>

$$R^2 = \frac{(Y_i - Y_{prom})^2}{(Y_i - Y_{prom})^2} \quad \text{Ecuación (8)}$$

## 2.4 TIPOS DE ERROR

### 2.4.1 Error Relativo $E_r$ (%)

El error relativo de una medida es el cociente entre el error absoluto de la medida y el valor real de ésta, el error relativo suele expresarse en %.

El error relativo representa la fracción de imprecisión cometida en la medición, resulta útil para comparar mediciones llevadas a cabo sobre diferentes magnitudes.

---

<sup>10</sup> Machicao, Nilton H., op. cit., p.33.

$$Er = \frac{Y_{est} - Y_{exp}}{Y_{exp}} * 100 \quad \text{Ecuación (9)}$$

### 2.4.2 Error Relativo Promedio, Erp (%)

Es una medida de la desviación relativa de los valores predichos con respecto a los valores experimentales. Cuanto menor sea el valor del Erp, más uniforme será la distribución de las diferencias positivas y negativas entre los valores predichos y aquellos experimentales.

La siguiente expresión define al error relativo promedio:

$$Erp = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Er)_i \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde;

n: número total de datos

### 2.4.3 Desviación Estándar

La desviación estándar, s, es una medida del grado de proximidad de los datos en torno al valor de la media. Cuanto menor es la desviación estándar, más estrechamente se agrupan los datos alrededor de la media<sup>11</sup>:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Xi - X_{prom})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

## 2.5 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

A diferencia de un análisis de regresión, el análisis de correlación se utiliza para medir la fuerza de asociación entre las variables. En este caso, el objetivo

---

<sup>11</sup> CHARRIS, Daniel. Análisis cuantitativo. Sexta edición

no es utilizar una variable para predecir las otras, sino sólo medir la relación y grado de dependencia entre ellas.

El análisis de correlación emplea métodos para medir la intensidad de asociación entre dos o más variables. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al concepto de regresión, pues, para que una ecuación de regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a la ecuación de regresión; además el coeficiente de correlación debe ser<sup>12</sup>:

- Grande cuando el grado de asociación es alto (cerca de +1 o -1) en el caso de R (coeficiente de correlación); si se habla de  $R^2$  (coeficiente de determinación), entonces el grado de asociación será alto cuanto el valor de  $R^2$  sea lo más cercano posible a 1.
- Pequeño cuando el grado de asociación es bajo, cerca de cero.
- Independiente de las unidades en que se miden las variables.

### **2.5.1 Coeficiente de Correlación Múltiple R**

Establece una medida del grado de asociación lineal entre la variable respuesta y la variable predictora, concretamente entre la variable respuesta y la recta de regresión estimada. Se define, a partir de los n pares de observaciones (R) y su valor varía entre -1 y +1.

Si  $R = -1$ , la asociación es perfecta pero inversa; es decir, a valores altos de una variable le corresponde valores bajos a la otra variable, y viceversa. Si  $R=+1$ , también la asociación es perfecta pero directa. En el caso que  $R=0$ , no existe asociación entre las dos variables. El coeficiente de correlación R, puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

---

<sup>12</sup> ASTUDILLO GABY. Correlaciones. Monografias.com

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Ecuación (12)

### 2.5.2 Coeficiente de Determinación Múltiple $R^2$

Puede interpretarse como el porcentaje de variabilidad de Y explicada o debida a la recta de regresión, en tanto que puede comprobarse que:

$$1 - R^2 = \frac{SSE}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Ecuación (13)

Cuando todos los puntos se encuentran sobre la recta de regresión estimada, es decir, "el ajuste es perfecto", la suma de cuadrados de residuos, SSE, toma el valor cero y, por tanto,  $R^2 = 1$ . El denominador de la última expresión es una medida de la variabilidad total de las n observaciones de la variable respuesta<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Glosario de Estadística, e-stadistica.bio.ucm.es, Aula virtual de Bioestadística, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Biología, Dpto. Matemática Aplicada. Biomatemática

## 2.6 MODELOS DE VISCOSIDAD PARA CRUDOS MUERTOS

Como primera medida, es importante aclarar que la viscosidad del petróleo debería ser determinada a partir de pruebas de laboratorio; pero si esto no es posible ya sea porque no se tiene disponibilidad de datos de laboratorio o simplemente por lo dispendioso que podría resultar esto, una buena opción sería realizar una estimación de la viscosidad mediante correlaciones empíricas desarrolladas en la literatura. Estas correlaciones varían en complejidad y precisión dependiendo tanto de los datos disponibles como de los rangos en que pueden usarse.

Existen correlaciones que permiten determinar la viscosidad de crudos sin gas en solución (muertos),  $\mu_{od}$  en cp., a presión atmosférica y temperatura del yacimiento. A continuación se presentarán los modelos desarrollados en la literatura para estimar el valor de la viscosidad de crudos muertos.

### 2.6.1 CORRELACIÓN DE EGBOGAD, E.O.

La correlación es la siguiente:

$$\log [\log (\mu_{od}+1)] = 1.8653 - 0.025086\gamma_{API} - 0.5644 \log T \text{ Ecuación (14)}$$

Donde;

$\mu_{od}$  : Viscosidad del petróleo libre de gas a 1 atm y T , en cp.

$\gamma_{API}$  : Gravedad del petróleo, °API

T : Temperatura del yacimiento, °F

Egbogad reporta un error promedio de 6.6% para la correlación. El rango de los datos utilizados en el desarrollo de la correlación presenta las siguientes características:  $59 < T(^{\circ}F) < 176$  y  $5 < \gamma_{API}(^{\circ}API) < 58$ .

## 2.6.2 CORRELACIÓN DE BEAL

El modelo de esta correlación presenta la viscosidad del petróleo libre de gas (muerto) en función de la gravedad API y varias temperaturas.

La viscosidad del petróleo saturado se basa en la viscosidad del petróleo muerto y se ajusta por el contenido de gas usando la relación gas petróleo. La viscosidad del petróleo no saturado se calcula usando la viscosidad saturada, la presión del punto de burbuja y la presión investigada. La relación gas petróleo y la presión del punto de burbuja puede estimarse usando una correlación como la de Standing<sup>14</sup>.

En el desarrollo de esta correlación se utilizó un total de 655 datos de viscosidades de crudos sin gas en solución a 100 °F y 98 a temperaturas mayores a 100 °F obtenidos de 492 campos diferentes, 358 de los cuales corresponden a los Estados Unidos. Beal reportó un error promedio de 24,2 % entre valores experimentales y datos de campo.

$$\mu_{od} = 0,32 + \frac{1,8 \cdot 10^7}{API^{4,53}} \frac{360}{T+210}^a \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$a = \text{antilog} \left( 0,43 + \frac{8,33}{API} \right) \quad \text{Ecuación (16)}$$

Dónde:

$\mu_{od}$  : Viscosidad del crudo muerto a 1 atm y T, cp.

API: Gravedad del petróleo API.

T: Temperatura del yacimiento, ° F

---

<sup>14</sup> Estrategias Innovadoras de Exploración y Producción, unicous.com/oilgas/solutions, Oil & Gas Automation Solutions (2005)

### 2.6.3 CORRELACIÓN DE KARTOATMODJO, T Y SCHMIDT, Z

La correlación es:

$$\mu_{od} = 16,0 * 10^8 T^{-2,8177} (\log \gamma_{API})^{(5.7526 \log T - 26,9718)} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Dónde:

$\mu_{od}$  : Viscosidad del petróleo libre de gas a 1 atm y T, cp, entre (0,5-682)

$\gamma_{API}$ : Gravedad del petróleo, °API, (entre 14,4-58,9).

T: Temperatura del yacimiento, °F, (entre 75-320).

En el desarrollo de esta correlación se utilizó un total de 661 muestras de diferentes crudos, y reporta un error promedio de -13,158%.

### 2.6.4 CORRELACIÓN DE VÁZQUEZ, M.E. Y BEGGS, H.D.

La correlación es:

$$\mu_o = \mu_{ob} \left( \frac{P}{P_b} \right)^m \quad \text{Ecuación (18)}$$

Dónde:

$$m = 2,6P^{1,187} \exp(-11,513 - 8,98 * 10^{-5}P).$$

$P_b$ : Presión de burbuja, Psi.

$\mu_{ob}$ : Viscosidad en el punto de burbuja, Cp.

P: Presión, Psi, (entre 141-9515).

$\mu_o$ : Viscosidad del crudo, Cp, (entre 0,117-148).

Esta correlación fue obtenida a partir de 3143 puntos de datos, Vásquez y Beggs reportan un error promedio de -7,54 % para la correlación.

## 2.6.5 CORRELACIÓN DE GLASO, O.

La correlación es:

$$\mu_{od} = 3,141 * 10^{10} T^{-3,444} (\log \gamma_{API})^{(10,313 \log T - 36,447)} \quad \text{Ecuación (19)}$$

$\mu_{od}$  : Viscosidad del petróleo libre de gas a 1 atm y T, cp, entre (0,616-39,1).

$\gamma_{API}$ : Gravedad del petróleo, °API, (entre 20,1-48,1).

T: Temperatura del yacimiento, °F, (entre 50-300).

Esta correlación fue desarrollada a partir de 26 muestras diferentes de crudos cubriendo determinados rangos<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> BANZER, CARLOS. Correlaciones numéricas PVT. (1996)

### **3. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Con el fin de determinar una correlación para el cálculo de la viscosidad de crudo muerto para crudos extrapesados, es necesario partir de una base de datos en la cual se relacionan las variables que influyen o que serán determinantes en el momento de hallar dicha correlación; Por tanto, el primer paso para llevar a cabo dicho propósito es realizar un diseño experimental que permita obtener mediante las pruebas de laboratorio la base de datos que se requiere.

Con las pruebas de laboratorio se pretende calcular la viscosidad de una muestra de crudo muerto monitoreando las variables que teóricamente influyen sobre la medida, y así, posteriormente, analizar el comportamiento y tendencia de la viscosidad respecto a dichas variables.

#### **3.1 SELECCIÓN DE LOS FACTORES**

El comportamiento de la viscosidad del crudo depende de varios factores y para este caso dichos factores serán la influencia que tienen algunas variables en la medida de viscosidad.

Para realizar el análisis sobre la influencia que tienen tales variables en la medida de viscosidad, es indispensable registrar sus valores con el objetivo de certificar que efectivamente los diferentes resultados de la medida de viscosidad son producto de la variación que causan dichas variables en el comportamiento de la viscosidad.

**Tabla 1:** Análisis de factores

FACTOR	MEDIDA	POSIBILIDAD
Temperatura	Cuantitativa	Conocida
Gravedad API	Cuantitativa	Conocida

**Fuente:** Autores del Proyecto.

### 3.1.1 Niveles de los Factores

Se analizarán una serie de niveles para cada factor, lo que indica que, cada factor presenta una varianza de posibilidades, lo cual se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 2:** Niveles de los factores

FACTOR	NIVELES
Temperatura	3
Gravedad API	10

**Fuente:** Autores del Proyecto.

**-Temperatura:** Las pruebas de laboratorio son realizadas a temperaturas específicas de 110, 150 y 180 °F mayores a la temperatura ambiente, esto para calentar la muestra y lograr que salga la espuma y tenga una apariencia de espejo.

**- Gravedad °API:** Se establecieron realizar pruebas con las muestra de crudo extrapesado que se tienen de diferentes gravedades °API (7,7; 7,8; 8; 8,1; 8,3; 8,3; 8,4; 8,5; 8,7; 8,9 °API).

### 3.1.2 Variables de Bloqueo

Para llevar a cabo las pruebas de laboratorio y realizar el análisis correspondiente, es necesario tener en cuenta algunas variables que puedan afectar los probables resultados a obtener; por tanto, se deben controlar algunas de ellas para garantizar que los resultados sean producto de la variación de los factores nombrados anteriormente. En la siguiente tabla se encuentran las variables que serán bloqueadas para dicho análisis.

**Tabla 3:** Variables de bloqueo

VARIABLES	MEDIDA	POSIBILIDAD
Presión	cuantitativa	conocida
Volumen de Crudo	cuantitativa	conocida
Velocidad	cuantitativa	conocida
Esf. Cortante	cuantitativa	conocida
G. Velocidad	cuantitativa	conocida

**Fuente:** Autores del Proyecto.

- **Presión:** El valor de la presión que se tiene durante las pruebas de laboratorio es la presión atmosférica.
- **Volumen de Crudo:** Para realizar las pruebas de laboratorio se cuenta mínimo con 1000 ml de muestra de crudo extrapesado de cada una de las gravedades °API que se tienen.
- **Velocidad:** En la prueba la velocidad (RPM) a la cual gira el husillo se controla para poder alcanzar la estabilización y de esta forma obtener el dato la viscosidad de la muestra a una temperatura específica.

- **Esfuerzo cortante:** El esfuerzo de corte (D/cm<sup>2</sup>) durante la prueba en laboratorio será una variable a monitorear para observar su comportamiento con respecto a la viscosidad.

- **Gradiente de velocidad:** En las pruebas el gradiente de velocidad (1/seg), es una medida que también será monitoreada para observar como es el cambio de velocidad, del husillo en el crudo extrapesado.

### 3.1.3 Variables Dependientes

El objetivo final del proyecto es determinar una correlación para el cálculo de la viscosidad de crudo muerto para crudos extrapesados a partir de una base de datos obtenidas mediante pruebas de laboratorio. Por ende, la viscosidad dinámica corresponde a la variable dependiente al análisis del proyecto.

## 3.2 TIPO DE DISEÑO EXPERIMENTAL

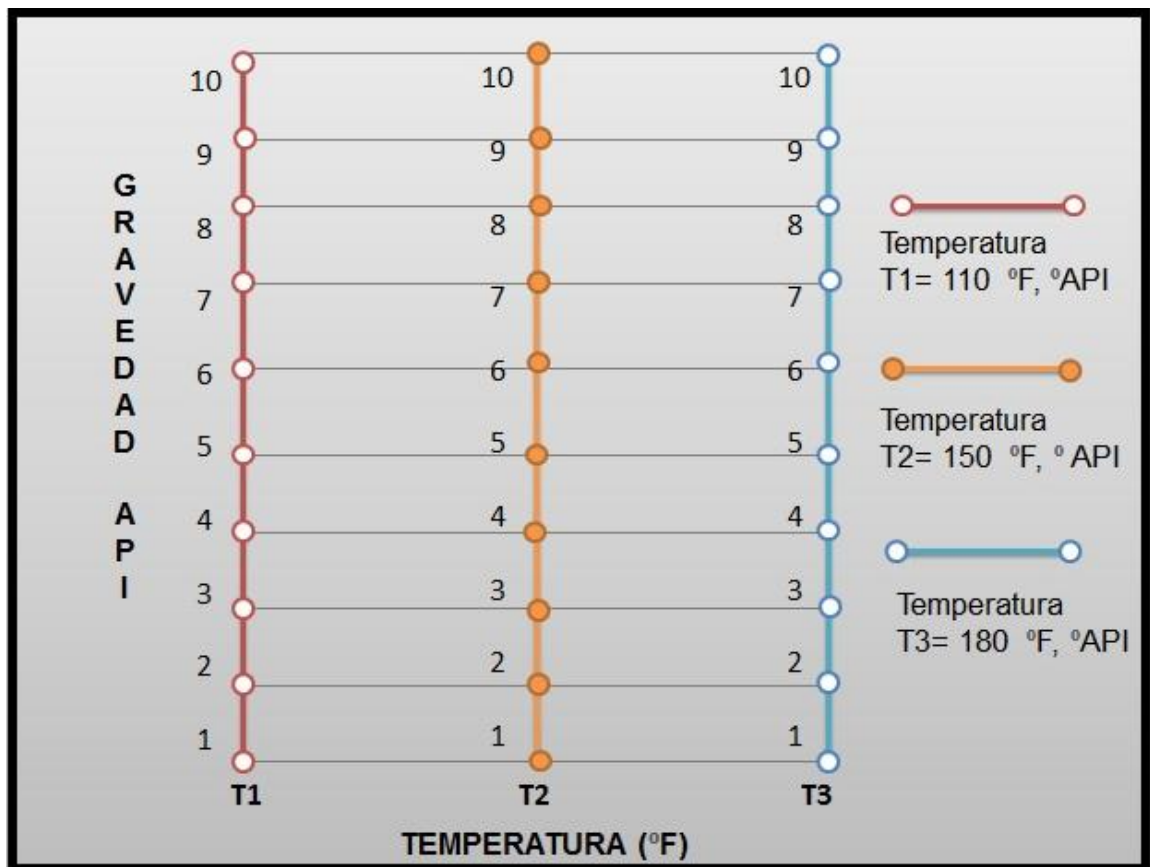
Por medio del diseño experimental y el posterior análisis de los resultados de las pruebas obtenidas en el laboratorio, se podrá establecer la influencia que tienen los factores en la viscosidad dinámica; dichos factores para este caso, son variables como la temperatura y la gravedad API que inciden directamente en el comportamiento de la variable dependiente, viscosidad dinámica.

Partiendo de un análisis estadístico de los datos de gravedad API y las respectivas muestras de crudo suministradas, se procede a realizar la selección de aquellos valores de gravedad °API que más predominan dentro de la información, con el fin de proponer el modelo factorial, para así, llevar a cabo las pruebas de laboratorio.

Para el desarrollo de las pruebas de laboratorio, se propone un modelo factorial 3<sup>2</sup> lo que indica evaluar la viscosidad en función de los dos factores establecidos temperatura y gravedad °API, donde los tres valores de temperatura a la cual se toman las pruebas tiene 10 niveles posibles; por tanto,

en el diseño experimental se establecen 30 pruebas con crudos extrapesados de 10 diferentes gravedades °API (7,7; 7,8; 8; 8,1; 8,3; 8,3; 8,4; 8,5; 8,7; 8,9 °API) evaluados a tres diferentes temperaturas (110;150 y 180 °F), así mismo durante la prueba se varían las RPM para cada prueba 10 veces (a cada vez se le denomina “step”) con el fin de escoger la velocidad máxima sin pasar el torque del 95% y del mismo modo se bajan las RPM para escoger la velocidad mínima sin bajar el torque del 15%; es decir el rango de variación de las RPM para cada prueba depende de qué tan rápido se estabilice la viscosidad.

**Figura 7:** Diseño experimental



Fuente: Autores del Proyecto.

### 3.2.1 Fase Experimental

Mediante el dominio experimental se genera una matriz de pruebas de laboratorio que plantea una secuencia con el fin de establecer un seguimiento

el comportamiento de la variable dependiente (viscosidad dinámica) en función de los dos factores nombrados anteriormente (Gravedad °API y Temperatura).

**Tabla 4:** Análisis de la matriz

<b>FACTOR 1</b>	<b>Gravedad °API</b>	°API 1	7,7
		°API 2	7,8
		°API 3	8
		°API 4	8,1
		°API 5	8,3
		°API 6	8,3
		°API 7	8,4
		°API 8	8,5
		°API 9	8,7
		°API 10	8,9
<b>FACTOR 2</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	T <sub>1</sub>	110
		T <sub>2</sub>	150
		T <sub>3</sub>	180

<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>Viscosidad Dinámica (Cp.)</b>	
---------------------------------	----------------------------------	--

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla 5:** Matriz de pruebas de laboratorio

N°	FACTOR 1 (GRAVEDAD °API)	FACTOR 2 (TEMPERATURA, °F)	VARIABLE DEPEDIENTE ( $\mu$ )
1	°API 1	T <sub>1</sub>	
2	°API 2	T <sub>1</sub>	
3	°API 3	T <sub>1</sub>	
4	°API 4	T <sub>1</sub>	
5	°API 5	T <sub>1</sub>	
6	°API 6	T <sub>1</sub>	
7	°API 7	T <sub>1</sub>	
8	°API 8	T <sub>1</sub>	
9	°API 9	T <sub>1</sub>	
10	°API 10	T <sub>1</sub>	
11	°API 1	T <sub>2</sub>	
12	°API 2	T <sub>2</sub>	
13	°API 3	T <sub>2</sub>	
14	°API 4	T <sub>2</sub>	
15	°API 5	T <sub>2</sub>	
16	°API 6	T <sub>2</sub>	
17	°API 7	T <sub>2</sub>	
18	°API 8	T <sub>2</sub>	
19	°API 9	T <sub>2</sub>	
20	°API 10	T <sub>2</sub>	

21	°API 1	T <sub>3</sub>	
22	°API 2	T <sub>3</sub>	
23	°API 3	T <sub>3</sub>	
24	°API 4	T <sub>3</sub>	
25	°API 5	T <sub>3</sub>	
26	°API 6	T <sub>3</sub>	
27	°API 7	T <sub>3</sub>	
28	°API 8	T <sub>3</sub>	
29	°API 9	T <sub>3</sub>	
30	°API 10	T <sub>3</sub>	

**Fuente:** Autores del Proyecto.

### 3.3 MATERIALES

Durante la realización de las pruebas en el laboratorio se requieren una serie de equipos e instrumentos con el fin de obtener correctas mediciones para el posterior análisis y así generar una correlación de mayor exactitud. Los equipos e instrumentos que requeridos se encuentran en la tabla 6.

**Tabla 6:** Instrumentos y equipos de laboratorio

INSTRUMENTOS Y EQUIPOS	CANTIDAD
Viscosímetro Rotacional Expert R: Equipado principalmente con un termostato de temperatura constante.	1
Husillos Cápsulas o porta muestras	Depende de la viscosidad de referencia del crudo extrapesado

Termómetros ASTM 17F y 22F	2
Baño de maría	1
Frascos de recolección de muestras	1
Termómetro	1
Hidrómetro	1

**Fuente:** Autores del proyecto

Para llevar a cabo las pruebas de laboratorio, se requiere de muestras de crudo extrapesado, del cual, en la tabla 7 se especifica el volumen de crudo que se necesita para cada muestra de diferente gravedad °API; el volumen de crudo se obtuvo mediante muestreo de campo y se tomó en cabeza de pozo de acuerdo a el tipo de crudo que se requiere; dichas muestras se obtuvieron de un total de 10 pozos.

**Tabla 7:** Volumen y sustancias requeridas

Sustancia	Volumen (ml)
Muestra de crudo extrapesado	500
Rompedor de emulsión	5 (por muestra)

**Fuente:** Autores del proyecto

- **Muestra de crudo:** Las propiedades de la muestra de crudo del Campo utilizada para la realización de las pruebas en el laboratorio se describen en la tabla 8.

**Tabla 8:** Propiedades del crudo

Propiedad	Valor
Viscosidad @P <sub>R</sub> = 3300 psig (cp), @T <sub>yac.</sub> = 184°F	771,636
Viscosidad @P <sub>sat.</sub> = 568 psig (cp), @T <sub>yac.</sub> = 184°F	299,139
S&W (%)	1,40
Densidad @P <sub>R</sub> = 3300 psig	0,9737
Densidad @60 °F, 14,7 psig	1,0154
°API	7-9
GOR (SCF/STB)	75

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Figura 8:** Toma de muestra en campo



**Fuente:** Autores del Proyecto

## **4. PRUEBAS DE LABORATORIO**

En la industria petrolera existen normas ya estandarizadas como lo son ASTM (American Society for Testing and Materials) y API (American Petroleum Institute) las cuales permiten integrar un criterio generalizado en el momento de realizar pruebas de laboratorio con el fin de describir y/o medir las propiedades de los crudos o de sus derivados.

Sin embargo, en algunas ocasiones los procedimientos contemplados en dichas normas no son necesariamente seguidos a cabalidad ya que depende de las condiciones y disponibilidad de equipos o instrumentos que se tenga en el momento de realizar pruebas de laboratorio. Por tanto, a continuación se presenta el procedimiento realizado para obtener las pruebas de laboratorio, así como también, la manera en que se obtuvieron las mediciones de la variable dependiente que para este caso es la viscosidad dinámica.

### **4.1 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DINÁMICA**

A nivel general el método para determinar la viscosidad consiste en la medición de la viscosidad rotacional de la muestra que toma movimiento a través de un husillo que ha sido calibrado, así mismo este gira en su propio eje generando una restricción al flujo, teniendo en cuenta condiciones de temperatura y velocidad controladas. Dicha velocidad (RPM) con la que gira el husillo se controla para alcanzar una estabilización para lograr obtener el dato de viscosidad de la muestra a una temperatura específica. Esta prueba se realiza para temperaturas específicas entre 110 °F y 150 - 180 °F, que depende del fluido y del tipo de estudio.

#### **Consideraciones**

El tipo de husillo a usarse se debe escoger teniendo en cuenta los parámetros de prueba que se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9:** Tipos de husillos

VELOCIDAD		HUSILLOS			
RPM	TR8	TR9	TR10	TR11	
0,01	5M	25M	50M	100M	<b>VISCOSIDAD</b>
0,3	166,6K	833,3K	1,6M	3,3M	
0,5	100K	500K	1M	2M	
0,6	83,3K	416,6K	833,3K	1,6M	
1	50K	250K	500K	1,1M	
1,5	33,3K	166,6K	333,3K	666,6K	
2	25K	125K	250K	500K	
2,5	20K	100K	200K	400K	
3	16,6K	83,3K	166,6K	333,3K	
4	12,5K	62,5K	125K	250K	
5	10K	50K	100K	200K	
6	8,3K	41,6K	83,3K	166,6K	
10	5K	25K	50K	100K	
12	4,16K	20,83K	41,6K	83,3K	
20	2,5K	12,5K	25K	50K	
30	1,6K	8,3K	16,6K	33,3K	
50	1K	5K	10K	20K	
60	833,3	4,16K	8,3K	16,6K	
100	500	2,5K	5K	10K	
200	250	1,25K	2,5K	5K	

**Fuente:** Autores del Proyecto.

La selección del husillo se realiza de acuerdo a la velocidad de estabilización con respecto a la viscosidad de referencia del fluido en estudio. No se recomienda trabajar con valores de viscosidad inferiores al 15% del fondo de escala seleccionada.

**Nota:** K Indica miles. Ejemplo: 8,3K = 8.300, M Indica millones Ejemplo: 1,1M = 1.100.000

### **Para tener en cuenta**

Se debe tener en cuenta que la muestra debe venir completamente deshidratada, es decir que no debe contener agua, debido a que ésta afectaría la medida de viscosidad, de igual manera el contenido de gases en solución debe ser extraído de la muestra , con el fin de obtener un valor de viscosidad de crudo muerto representativo.

### **Condiciones Medioambientales**

- Uso externo.
- Altura máxima 2000 m
- Temperatura ambiente de: +5 a 40°C
- Humedad relativa máxima 80% hasta 31°C , descendiendo hasta 50 % de humedad relativa a 40 °C.
- Las fluctuaciones de la red eléctrica no deberían sobrepasar el  $\pm 10\%$  de la tensión nominal.
- Categoría de instalación II.
- Nivel de polución II.

#### **4.1.1 Equipos, Elementos y Reactivos**

- Viscosímetro Rotacional Expert R: Equipado principalmente con un termostato de temperatura constante.
- Husillos.
- Cápsulas o porta muestras.
- Termómetros ASTM 17F y 22F
- Baño de maría.
- Frascos de recolección de muestras.

## **Preparación**

- Estabilizar el baño del viscosímetro a la temperatura de realización de la prueba. Suministrando agitación adecuada y control térmico al baño de tal forma que la temperatura no presente fluctuaciones de  $\pm 0,05$ .
- Colocar la muestra en la cápsula hasta la marca adecuada en el husillo y precalentar sin exceder más de 3F a la temperatura de prueba (Para temperaturas superiores a 150 °F, precaliente de 5 a 6 °F por encima de la temperatura de prueba). Agitar continuamente homogeneizando la temperatura del líquido de prueba. Teniendo cuidado de no calentar a temperatura que esté dentro de los 50 F por debajo del punto de relampagueo de la muestra esto debido a que la volatilidad pérdida puede alterar la composición.

### **4.1.2 Procedimiento**

Para realizar este procedimiento se recomienda haber leído con anticipación el manual del equipo que se va a usar para dicho propósito y conocer los comandos básicos para poder operarlo manera adecuada.

1. Poseer un frasco totalmente limpio para evitar que se contamine el crudo cuando se tome la muestra de éste.

**Figura 9:** Frascos de recolección de muestras



**Fuente:** Autores del Proyecto.

2. Tomar la muestra, ya sea en cabeza o en separador: abrir la válvula para drenar el petróleo muerto que está en el tubing para luego poder tomar la muestra completamente del fluido que está pasando por la línea principal en ese momento.

**Figura 10:** Recolección de la muestra de petróleo



**Fuente:** Autores del Proyecto.

3. Etiquetar la muestra de crudo con su respectiva etiqueta con todos datos: Fecha, Pozo, Cluster, set, API, analista, observaciones, producto y etiqueta de seguridad.

**Figura 11:** Etiqueta



**Fuente:** Autores del Proyecto.

4. Como para este caso se conoce que las muestras tienen un S&W alto, aproximadamente 1,6 %, se debe calentar la muestra, con unas gotas de rompedor, para luego dejar decantar la mayor cantidad de agua, hasta que la muestra de espejo.

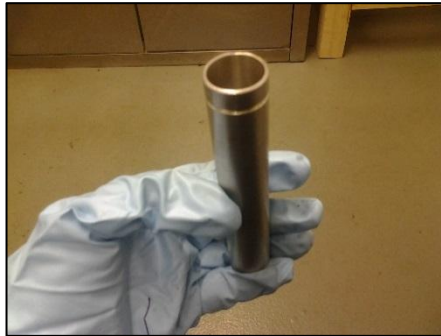
**Figura 12:** Muestra sin burbujas



**Fuente:** Autores del Proyecto.

5. En el momento en que la muestra esté completamente deshidratada y sin espuma, se lleva a él porta muestras teniendo en cuenta la cantidad necesaria para el husillo seleccionado.

**Figura 13:** Cápsulas o porta muestra



**Fuente:** Autores del Proyecto.

6. De acuerdo con la tabla 1, se selecciona el husillo apropiado para el tipo de petróleo analizar.

**Figura 14:** Husillos



**Fuente:** Autores del Proyecto.

Nota: Para los husillos tipo TR que se utilizarán para los análisis de viscosidad en el laboratorio se realiza de ésta misma forma, debido al petróleo extrapesado, de lo contrario se usa como guía el manual para otro tipo de husillos.

7. Se fija el toma muestras en el viscosímetro y se mide con el husillo que el nivel de la muestra sea el adecuado, es decir, debe estar por encima de la parte cónica sin pasar de la muesca donde está grabada la identificación del husillo.

**Figura 15:** Preparación del equipo para realizar la prueba



**Fuente:** Autores del Proyecto.

8. se verifica que el nivel sea adecuado, paso seguido bajar la cápsula con la muestra hasta el termostato, especificando en el controlador del termostato la temperatura de prueba.

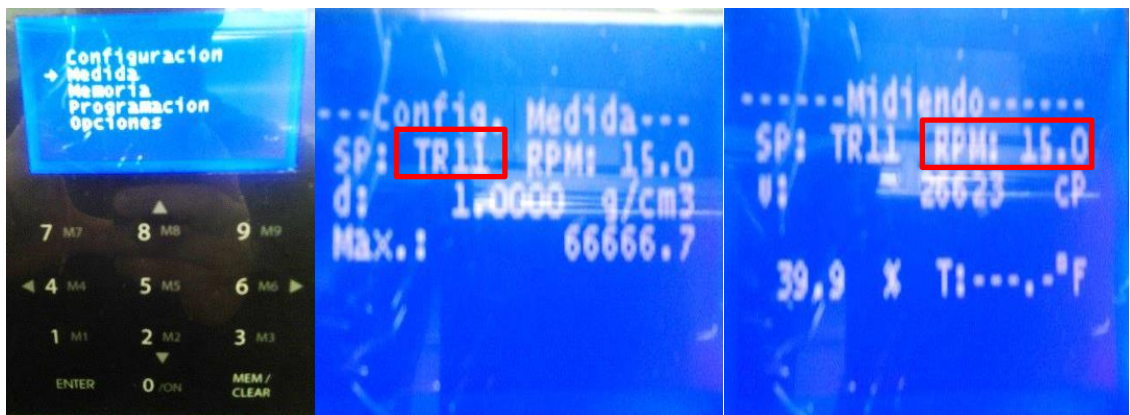
**Figura 16:** Temperatura de prueba



**Fuente:** Autores del Proyecto.

9. Esperar un tiempo a que la muestra estabilice la temperatura de prueba, paralelamente en menú principal se programa la prueba de viscosidad, entonces en la opción “media” se especifica el husillo (SP) y se escoge una velocidad que mantenga el torque entre el 15% y 95%.

**Figura 17:** Velocidad RPM



**Fuente:** Autores del Proyecto

10. Con el fin homogeneizar la temperatura en toda la muestra, se debe poner a girar el husillo.

**Figura 18:** Homogenización de la muestra con la temperatura



**Fuente:** Autores del Proyecto.

Nota: Esperar a que la viscosidad baje a un punto donde la medida se sostenga o no varié mucho. Tiempo aproximadamente entre 15 y 25 minutos depende de la muestra.

11. En el momento en que la viscosidad sea estable se comienza a subir las RPM para escoger la velocidad máxima sin pasar el torque del 95% y del mismo modo bajamos las RPM para escoger la velocidad mínima sin bajar el torque del 15%.

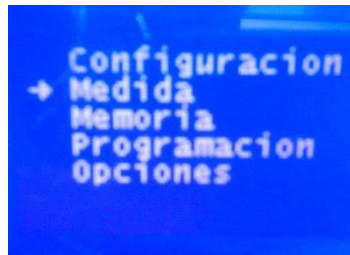
**Figura 19:** Programación del torque (>15% y < 95%)



**Fuente:** Autores del Proyecto.

12.. Cuando se logren las RPM apropiadas parar el motor para luego regresar al menú principal.

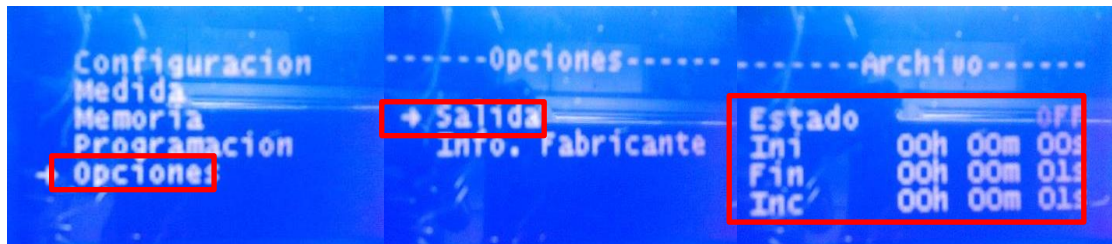
**Figura 20:** Menú principal



**Fuente:** Autores del Proyecto.

13. Estando en el menú principal se va a “opciones” y “salida” donde sale la siguiente pantalla.

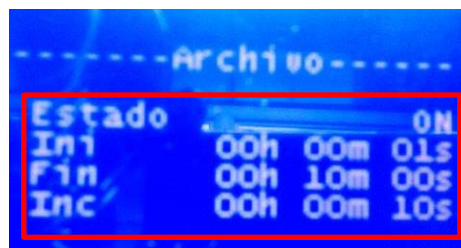
**Figura 21:** Programación de la salida de datos



**Fuente:** Autores del Proyecto.

14. Se debe Programar la siguiente forma para empezar la prueba desde el primer segundo que arranque el motor con una duración de 10 minutos y tomando medidas con intervalos de 10 segundos.

**Figura 22:** Programación de la toma de datos de la prueba



**Fuente:** Autores del Proyecto

Nota: El comando “estado” se debe dejar en ON para que el viscosímetro nos guarde los datos de la prueba y los podamos descargar al computador.

15. Escoger la opción de regresar al menú principal y tomar la opción “programación” donde está la función “multistep”, en esta función se programan 10 step o pasos, cada uno a 1 minuto especificando el husillo que se utilizará, en el step 1 debe poner las RPM mínimas que se escogieron previamente y se va subiendo las RPM en cada step hasta llegar a las máximas RPM en el step 10, terminando el ultimo step pulsando enter para que quede grabada la configuración y posteriormente ON para arrancar la prueba que durara 10 minutos.

Nota: En el tiempo que dura esta prueba (10 minutos) se debe dejar el viscosímetro lo más quieto posible y libre de vibraciones para que la medida de viscosidad no se vea afectada y así obtener datos más precisos.

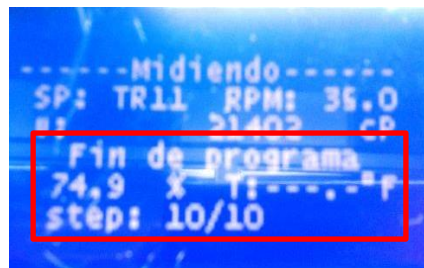
**Figura 23:** Programación de los step



Fuente: Autores del Proyecto

16. Cuando se haya terminado la prueba aparecerá en pantalla un aviso “Fin del Programa”, se pulsa MEM/CLEAR para volver al menú principal y ya se puede ver los resultados en el computador por medio del software del equipo; luego, se descargan los datos y para graficarlos en un archivo de Excel donde también se calcula la viscosidad real de la muestra. A continuación, para la muestra de gravedad  $^{\circ}\text{API}=7,7$  a una temperatura de  $180^{\circ}\text{F}$ , en las tablas 10, 11 y 12 así como en las figuras 25 y 26 se encuentran tanto los resultados arrojados por el viscosímetro como el procedimiento y los cálculos a seguir para finalmente obtener la viscosidad de dicha muestra a tales condiciones. Las figuras y tablas del reporte de resultados de las viscosidades de las demás muestras de crudo obtenidas a partir de las pruebas de laboratorio a diferentes temperaturas se encuentran especificadas en el anexo A.

**Figura 24:** Finalización de la prueba



**Fuente:** Autores del Proyecto.

17. Por último, se termina la prueba con la limpieza del equipo, de tal manera que quede listo para analizar una próxima muestra.

**Tabla 10:** Ejemplo, reporte de resultados

<b>RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F</b>						
<b>STEP</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Viscosidad</b>	<b>Torque / Par</b>	<b>Esf.Cortante</b>	<b>G.Velocidad</b>	<b>Tiempo</b>
	<b>(rpm)</b>	<b>(cp)</b>	<b>(%)</b>	<b>(D/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>(1/seg)</b>	<b>(hr:min:seg)</b>
STEP1	60	1014,31	12,17	170,40	17	00:00:05
	60	1013,99	12,17	170,35	17	00:00:10
	60	1013,71	12,16	170,30	17	00:00:15
	60	1013,00	12,16	170,18	17	00:00:20
	60	1012,38	12,15	170,08	17	00:00:25
STEP2	70	1005,75	14,08	197,13	20	00:00:30
	70	1005,27	14,07	197,03	20	00:00:35
	70	1004,88	14,07	196,96	20	00:00:40
	70	1004,41	14,06	196,86	20	00:00:45
	70	1003,96	14,06	196,78	20	00:00:50
STEP3	75	1000,15	15,00	210,03	21	00:00:55
	75	999,18	14,99	209,83	21	00:01:00
	75	997,96	14,97	209,57	21	00:01:05
	75	997,48	14,96	209,47	21	00:01:10
	75	996,52	14,95	209,27	21	00:01:15
STEP4	80	992,87	15,89	222,40	22	00:01:20
	80	991,99	15,87	222,21	22	00:01:25
	80	990,74	15,85	221,93	22	00:01:30
	80	989,87	15,84	221,73	22	00:01:35
	80	988,44	15,82	221,41	22	00:01:40
STEP5	90	984,40	17,72	248,07	25	00:01:45
	90	983,59	17,70	247,86	25	00:01:50
	90	982,35	17,68	247,55	25	00:01:55

	90	980,96	17,66	247,20	25	00:02:00
	90	979,94	17,64	246,94	25	00:02:05
STEP6	100	975,69	19,51	273,19	28	00:02:10
	100	975,58	19,51	273,16	28	00:02:15
	100	975,31	19,51	273,09	28	00:02:20
	100	975,19	19,50	273,05	28	00:02:25
	100	974,86	19,50	272,96	28	00:02:30
STEP7	105	970,73	20,39	285,39	29	00:02:35
	105	970,67	20,38	285,38	29	00:02:40
	105	970,75	20,39	285,40	29	00:02:45
	105	970,74	20,39	285,40	29	00:02:50
	105	970,80	20,39	285,41	29	00:02:55
STEP8	120	972,62	23,34	326,80	34	00:03:00
	120	972,79	23,35	326,86	34	00:03:05
	120	972,83	23,35	326,87	34	00:03:10
	120	972,74	23,35	326,84	34	00:03:15
	120	972,68	23,34	326,82	34	00:03:20
STEP9	135	971,74	26,24	367,32	38	00:03:25
	135	971,62	26,23	367,27	38	00:03:30
	135	971,68	26,24	367,30	38	00:03:35
	135	971,53	26,23	367,24	38	00:03:40
	135	971,13	26,22	367,09	38	00:03:45
STEP10	140	968,13	27,11	379,51	39	00:03:50
	140	967,73	27,10	379,35	39	00:03:55
	140	967,32	27,09	379,19	39	00:04:00
	140	966,84	27,07	379,00	39	00:04:05

	140	966,29	27,06	378,79	39	0:04:10

**Fuente:** Autores del Proyecto.

### 4.1.3 Cálculos

- Para cada uno de los step se debe calcular el promedio de cada valor teniendo en cuenta la estabilización de la prueba, esto debido a que al comienzo de la prueba se encuentran valores altos en viscosidad, debido a que el husillo realiza el mayor esfuerzo de corte para generar el movimiento.
- Para calcular el gradiente de velocidad es necesario realizar la siguiente operación:

$$GV = \left( \frac{\text{Esfuerzo cortante}}{\text{Viscosidad}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación (20)}$$

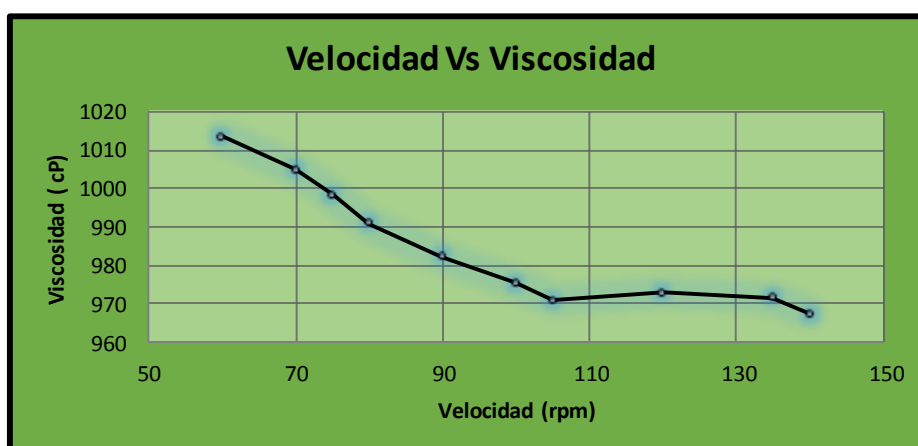
**Tabla 11:** Ejemplo, resultados promedio de cada step

RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	60	1013,48	12,16	170,26	17
STEP 2	70	1004,85	14,07	196,95	20
STEP 3	75	998,26	14,97	209,63	21
STEP 4	80	990,78	15,85	221,94	22
STEP 5	90	982,25	17,68	247,53	25

STEP 6	100	975,33	19,51	273,09	28
STEP 7	105	970,74	20,39	285,40	29
STEP 8	120	972,73	23,35	326,84	34
STEP 9	135	971,54	26,23	367,24	38
STEP 10	140	967,26	27,08	379,17	39

Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 25: Comportamiento velocidad vs. Viscosidad



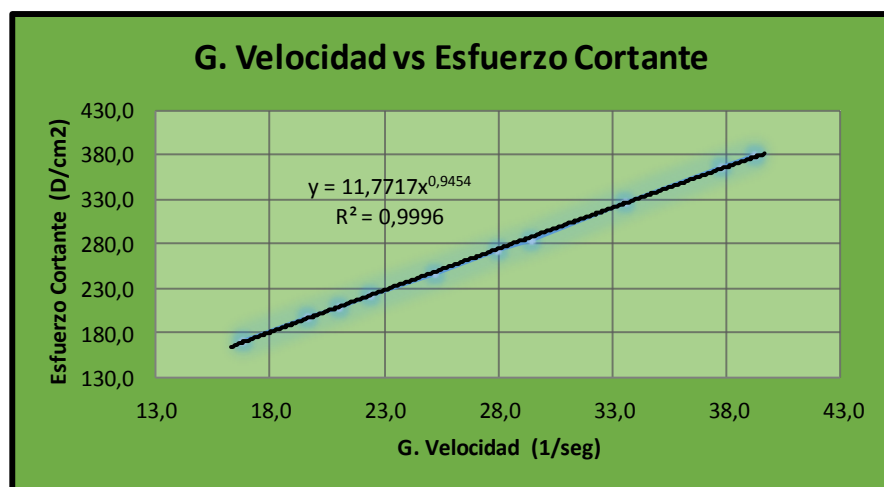
Fuente: Autores del Proyecto.

- Una vez obtenidos los resultados promedios de cada step se procede a realizar las siguientes gráficas para poder determinar la viscosidad del fluido real. Primero se realiza una gráfica de velocidad vs viscosidad.
- De acuerdo con el comportamiento que se observa figura 25, se concluye que la viscosidad va disminuyendo conforme vaya aumentando la velocidad del husillo, lo cual representa un comportamiento real de la viscosidad de un fluido; por tanto, con esta gráfica se puede intuir que la

prueba fue realizada de manera correcta y los datos obtenidos son representativos.

- Para poder calcular la viscosidad del fluido, a continuación, se realiza una gráfica gradiente de velocidad vs esfuerzo cortante

**Figura 26:** Gradiente de velocidad vs. esfuerzo de corte



**Fuente:** Autores del Proyecto.

- Con la anterior gráfica se pretende comprobar si existe una línea del comportamiento del fluido con respecto al gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte que garantice que el modelo ajusta a un comportamiento potencial el cual está representado por la siguiente ecuación para poder calcular la viscosidad del fluido:

$$\bar{\gamma} = KD^n \quad \text{Ecuación (21)}$$

$\bar{\gamma}$  = Esfuerzo cortante.

$D$  = Gradiente de velocidad.

**n**= Índice de flujo.

**K**= Indicador de consistencia.

- A continuación por medio del siguiente algoritmo se procede a calcular la viscosidad de fluido, arrojando también un valor de % aproximación de los resultados el cual verifica la veracidad de los datos.

Function Vis\_150 (t, D, n, K, K1)

Dim t1 As Double

$$t1 = K1 * (D ^ n)$$

$$\text{Viscosidad}_{150} = K1 * 100$$

If t > t1 Then

$$\text{Aprox}_{150} = (t1 / t) * 100$$

Else

$$\text{Aprox}_{150} = (t / t1) * 100$$

End If

- Y por último se obtiene el valor de viscosidad calculado en este caso, para el ejemplo de una muestra de crudo de 7,7 °API y a una temperatura de 180 °F la cual fue de 1177 cp:

**Tabla 12:** Ejemplo, cálculo de la viscosidad para muestra de crudo con gravedad °API=7,7

RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 180°F		
n	0,9454	
μ	1177	cp
% Aproximación	99,58	%

**Fuente:** Autores del Proyecto.

## **Mantenimiento del Equipo**

- Limpiar siempre todas las partes después de su utilización, limpiar a fondo los husillos y el protector de husillos, luego secarlos inmediatamente después. Asegurar que no quedan restos de muestras especialmente en zonas delicadas como el conector de husillos.

- Usar detergentes o disolventes para limpiar los husillos y el protector:

- Para las muestras de alimentos utilice agua tibia y si es necesario utilice detergentes suaves (como los que se utilizan en el hogar)

- Otros disolventes que generalmente dan buenos resultados son acetona, gasolina o de alto porcentaje de alcohol.

- Si utiliza cualquier otro disolvente, asegurarse de que no corroe los husillos o el protector. Estos husillos están fabricados en AISI 316.

Nota: Manipule con sumo cuidado solventes volátiles e inflamables. Es responsabilidad del usuario establecer las condiciones de seguridad al trabajar.

- Compruebe regularmente la rosca de los husillos y del eje del viscosímetro.
- Durante la vida útil del viscosímetro, el equipo podrá requerir de ciertas comprobaciones. En este caso, por favor, contacte con su distribuidor local.
- Un mantenimiento regular es importante. Recomendamos una comprobación anual por parte del servicio técnico de su distribuidor local.
- Para cambiar el fusible, se debe asegurar que el nuevo fusible tenga las mismas especificaciones (250VAC ~ 2A).
- La fuente de alimentación tiene doble aislamiento o aislamiento reforzado para la fijación de la varilla, la tuerca y la partes de los husillos. (Ver el datasheet de la fuente de alimentación).

**TABLA 13:** Consolidado de los resultados de pruebas de laboratorio

<b>N°</b>	<b>FACTOR 1 (GRAVEDAD °API)</b>	<b>FACTOR 2 (TEMPERATURA, °F)</b>	<b>VISCOSIDAD (cp)</b>
1	7,7	110	30809
2	7,8	110	29584
3	8	110	26679
4	8,1	110	26160
5	8,3	110	23517
6	8,3	110	23505
7	8,4	110	22727
8	8,5	110	21764
9	8,7	110	20207
10	8,9	110	20225
11	7,7	150	7444
12	7,8	150	5788
13	8	150	5643
14	8,1	150	4963
15	8,3	150	4227
16	8,3	150	3651
17	8,4	150	3551
18	8,5	150	3500
19	8,7	150	2511
20	8,9	150	7323
21	7,7	180	1177
22	7,8	180	1071
23	8	180	1069
24	8,1	180	1050
25	8,3	180	1056
26	8,3	180	1035

<b>27</b>	8,4	180	975
<b>28</b>	8,5	180	894
<b>29</b>	8,7	180	841
<b>30</b>	8,9	180	1403

**Fuente:** Autores del proyecto.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Luego de obtener los valores de viscosidad a partir de las pruebas realizadas en el laboratorio a diferentes temperaturas y gravedades °API, se analizan los resultados para escoger aquellos datos que mejor se ajusten al comportamiento esperado de los valores de viscosidad en función de la °API y la temperatura; dichos valores esperados son precisamente el fundamento de la fuerza de correlación que existe entre los dos factores establecidos (gravedad °API y temperatura) y la variable dependiente (viscosidad), y la tendencia que se espera es la siguiente: la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura y de alguna manera, se puede decir que también lo es con la gravedad °API.

**Tabla 14:** Comportamiento viscosidad a partir de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio

No. FILA	° API	VISCOSIDAD @T=110 °F	VISCOSIDAD @T=150 °F	VISCOSIDAD @T=180 °F
1	7,7	30809	7444	1177
2	7,8	29584	5788	1071
3	8	26679	5643	1069
4	8,1	26610	4963	1050
5	8,3	23517	4227	1056
6	8,3	23505	3651	1035
7	8,4	22727	3551	975
8	8,5	21764	3500	894
9	8,7	20707	2511	841
10	8,9	20225	7323	1403

**Fuente:** Autores del Proyecto.

Por medio de un análisis estadístico simple, se observa que la mayoría de los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio tanto de los factores como de la variable dependiente se ajustan al comportamiento mencionado anteriormente; sin embargo, para efectos de obtener una correlación más precisa, se determina descartar datos atípicos al comportamiento esperado como lo son: los datos correspondientes a la fila número 5 de la tabla 14 ya que en la prueba de viscosidad realizada @T=180 °F no se obtuvo el comportamiento esperado al comparar el valor de viscosidad con los demás valores a la misma temperatura; de igual manera, se elimina la fila número 10 de la tabla 14 porque los valores de la viscosidad @T=150 °F y @T=180 °F son atípicos si se comparan con el comportamiento que tienen los demás a las mismas temperaturas.

Por tanto, luego de la anterior selección de datos se establecen un total de veinte y cuatro (24) valores de viscosidad a ocho diferentes gravedades °API evaluadas cada una a tres temperaturas para así empezar a construir la correlación:

**Tabla 15:** Conjunto de datos seleccionados

No. FILA	° API	VISCOSIDAD @T=110 °F	VISCOSIDAD @T=150 °F	VISCOSIDAD @T=180 °F
1	7,7	30809	7444	1177
2	7,8	29584	5788	1071
3	8	26679	5643	1069
4	8,1	26610	4963	1050
5	8,3	23505	3651	1035
6	8,4	22727	3551	975
7	8,5	21764	3500	894
8	8,7	20707	2511	841

**Fuente:** Autores del Proyecto

## 5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Una vez que se haya analizado el comportamiento del conjunto de datos seleccionados a partir de las pruebas de laboratorio (Tabla 15), se ha podido establecer que la tendencia y el grado de asociación que existe entre los valores de las viscosidades y las gravedades °API a diferentes temperaturas, se aproxima a el comportamiento normal esperado para así poder determinar la correlación que se busca generar; dicho comportamiento es comprobado por medio de la herramienta *Solver* del software *Microsoft Excel 2013* ya que permite realizar un análisis de regresión lineal múltiple determinando el coeficiente de correlación múltiple “ $R$ ” así como el coeficiente de determinación “ $R^2$ ” para los cuales se obtuvieron los valores que se encuentran en la tabla 16.

**Tabla 16:** Análisis estadístico de regresión lineal múltiple

Resumen	
Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple $R$	0,95
Coeficiente de determinación $R^2$	0,90

**Fuente:** Autores del Proyecto.

## 5.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA GRAVEDAD °API PARA CADA UNA DE LAS TEMPERATURAS

En la figura 27, se puede evidenciar el comportamiento que tiene la viscosidad al graficar sus valores obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio para cada una de las muestras de crudo de diferente gravedad °API (valores representados como puntos sobre las rectas de la figura 27) siendo éstos agrupados en las tres diferentes temperaturas para las cuales se realizaron las dichas pruebas; por tanto se puede establecer que: para  $T=110$  °F que es la menor temperatura a la cual se llevaron a cabo las pruebas, se observa que se

tienen los valores de viscosidad más altos; cuando  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{F}$  se obtienen los valores medios de viscosidad y finalmente para cuando  $T=180\text{ }^{\circ}\text{F}$ , se tienen los valores de viscosidad más bajos, notándose siempre que para las tres diferentes temperaturas el comportamiento de la viscosidad en función de la gravedad  $^{\circ}\text{API}$  se conserva, son inversamente proporcionales al igual que la temperatura con la viscosidad.

Para efectos de llevar a cabo el análisis de la variable dependiente, viscosidad, en función de la gravedad  $^{\circ}\text{API}$  sus tendencias son asumidas de manera lineal, debido a que los valores (ver figura 27) de gravedad  $^{\circ}\text{API}$  de las muestras para las cuales se realizaron las pruebas de laboratorio son muy cercanos entre sí, ajustándose a una línea recta la cual representa de una mejor manera su comportamiento.

#### 5.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA CADA GRAVEDAD $^{\circ}\text{API}$

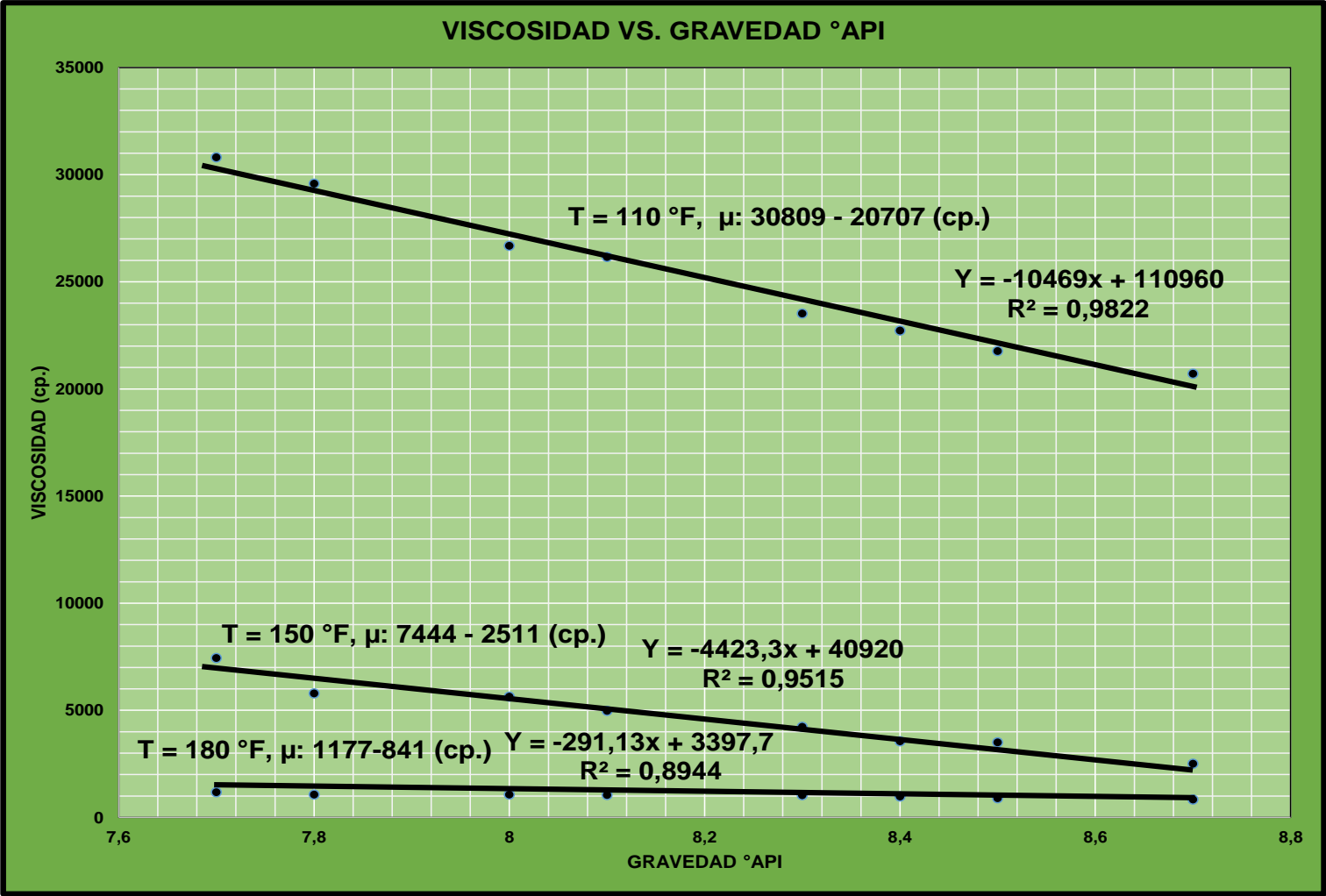
En cuanto al comportamiento de la viscosidad en función de las diferentes temperaturas a las se realizaron las pruebas de laboratorio para cada una de las muestras de crudo con diferentes gravedades  $^{\circ}\text{API}$  (ver datos de ejemplo para graficar en la tabla 17), se realiza una gráfica que permita evidenciar si efectivamente su comportamiento se ajusta a una tendencia exponencial como normalmente debe suceder al graficar viscosidad vs. temperatura (ver figura 28); el criterio de ajuste para cada grafica será el valor del coeficiente de determinación  $R^2$  el cual debe ser lo más cercano posible a 1.

**Tabla 17:** Datos para graficar curva de tendencia

$^{\circ}\text{API}$	Viscosidad (cp.)	Temperatura ( $^{\circ}\text{F}$ )
7,7	30809	110
	7444	150
	1177	180

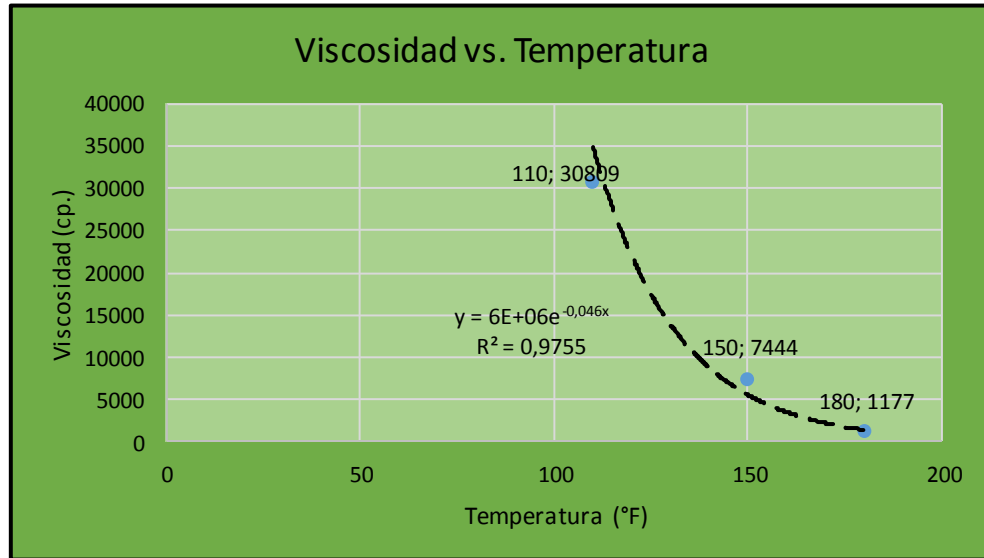
Fuente: Autores del Proyecto.

Figura 27: Comportamiento de la viscosidad en función de la gravedad °API a tres diferentes temperaturas



Fuente: Autores del Proyecto.

**Figura 28:** Curva exponencial ajustada de viscosidad vs. temperatura  
@gravedad °API = 7,7



**Fuente:** Autores del Proyecto.

A partir de la ecuación exponencial que se ajusta de manera casi que ideal al comportamiento que debe tener la viscosidad en función de la temperatura (figura 28), se obtienen nuevos valores de viscosidad en función de diferentes temperaturas y para cada uno de los valores de gravedad °API de las muestras de crudo; esto con el fin de comprobar que la tendencia normal de la curva se sigue conservando al compararla con la tendencia de los datos que se obtuvieron en el laboratorio (ver tabla 18) y así obtener nuevas series de datos para hacer más robustos los modelos de correlación que se pretenden crear. Los demás datos de viscosidad obtenidos en el laboratorio para cada muestra a diferentes temperaturas a partir de los cuales se generan sus respectivas curvas de tendencia para así obtener las nuevas series de datos se encuentran en el anexo B.

**Tabla 18:** Valores de viscosidad y temperatura obtenidos por ecuación de la curva @gravedad °API = 7,7

Y = 6E+06e-0,046X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
24039,08	120
15175,70	130
9580,30	140
3818,04	160
2410,30	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

## 5.5 DETERMINACIÓN DE NUEVAS SERIES DE DATOS

Por medio del ajuste realizado a partir de la ecuación exponencial que satisface el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura y para cada valor de gravedad °API, se generan unas nuevas series de datos, los cuales corresponden a los valores de la tabla 19.

Las nuevas series de datos obtenidas son agregadas y superpuestas en la gráfica donde se evidencia el comportamiento de la viscosidad en función de la gravedad °API y a tres diferentes temperaturas (figura 27); al incluir estas series de datos, se obtiene como resultado una gráfica (figura 29) formada por pares de valores de viscosidad vs gravedad °API agrupados en series de nuevas diferentes temperaturas (120, 130, 140, 160 y 170 °F) e incluyendo aquellas a las que se realizaron las pruebas de laboratorio (110,150 y 180 °F).

**Tabla 19:** Series de datos para generar la correlación

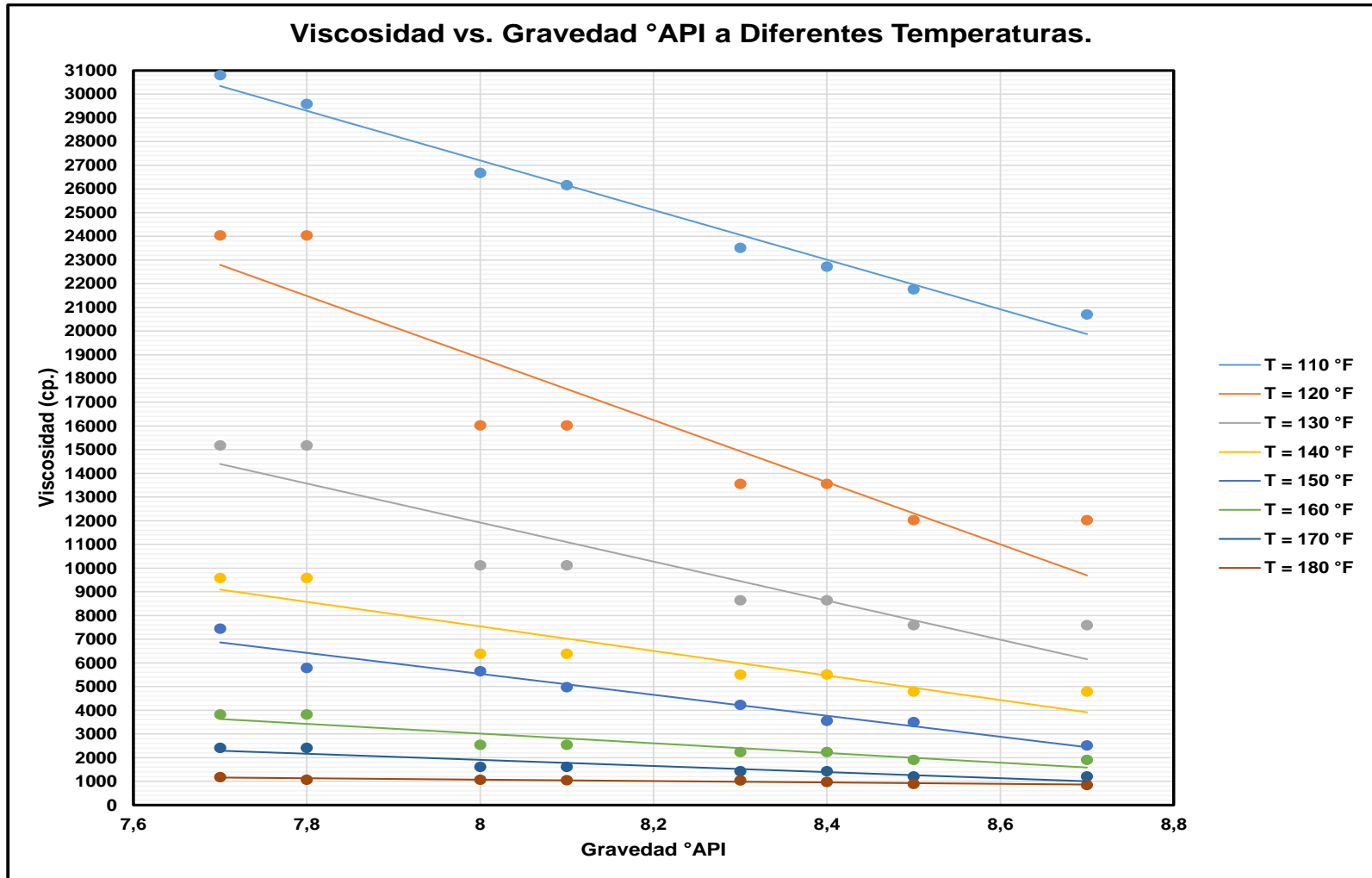
T=120°F			T=130°F			T=140°F		
Viscosidad (cp.)		°API	Viscosidad (cp.)		°API	Viscosidad (cp.)		°API
24039,08		7,7	15175,69		7,7	9580,30		7,7
24039,08		7,8	15175,69		7,8	9580,30		7,8
16026,05		8	10117,13		8	6386,86		8
16026,05		8,1	10117,13		8,1	6386,86		8,1
13551,95		8,3	8641,22		8,3	5509,96		8,3
13551,95		8,4	8641,22		8,4	5509,96		8,4
12019,54		8,5	7587,84		8,5	4790,15		8,5
12019,54		8,7	7587,84		8,7	4790,15		8,7

T=160°F			T=170°F		
Viscosidad (cp.)		°API	Viscosidad (cp.)		°API
3818,037		7,7	2410,30		7,7
3818,037		7,8	2410,30		7,8
2545,358		8	1606,86		8
2545,358		8,1	1606,86		8,1
2240,243		8,3	1428,46		8,3
2240,243		8,4	1428,46		8,4
1909,018		8,5	1205,15		8,5
1909,018		8,7	1205,15		8,7

Fuente: Autores del Proyecto

Figura 29: Superposición de nuevas series de datos



Fuente: Autores del Proyecto

## 6. GENERACIÓN DE LA CORRELACIÓN

### 6.1 AJUSTE PARA NUEVAS SERIES DE DATOS

Para cada una de las series de datos que se encuentran en la figura 29 del capítulo 5, mediante una regresión lineal basada en una línea de tendencia, la cual es aquella que mejor representa el comportamiento de tales datos, se obtiene un ajuste representado en la figura 30.

### 6.2 DETERMINACIÓN DE MODELOS DE CORRELACIÓN

Finalmente, cada una de las expresiones que mejor representan el comportamiento de las series de datos para cada temperatura en la figura 30, se convierten en los modelos de correlación generados para calcular la viscosidad del crudo muerto y extrapesado en función de la gravedad °API y a una determinada temperatura; tales modelos de correlación son presentados a continuación con sus respectivos rangos de validez:

Para T=110 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -10469^{\circ}API + 110960 \quad \text{Ecuación (22)}$$

Para T=120 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -13103^{\circ}API + 123687 \quad \text{Ecuación (23)}$$

Para T=130 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -8238,7^{\circ}API + 77835 \quad \text{Ecuación (24)}$$

Para T=140 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -5180^{\circ}API + 48978 \quad \text{Ecuación (25)}$$

Para T =150 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -4423,3^{\circ}API + 40920 \quad \text{Ecuación (26)}$$

Para T=160 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -2047,4^{\circ}API + 19391 \quad \text{Ecuación (27)}$$

Para T=170 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -1287,1^{\circ}API + 12201 \quad \text{Ecuación (28)}$$

Para T=180 °F, gravedad °API 7,7- 8,7

$$\mu_{od} = -291,13^{\circ}API + 3397,7 \quad \text{Ecuación (29)}$$

Cabe destacar, que para calcular la viscosidad de un crudo muerto y extrapesado en función de la gravedad °API y a una determinada temperatura se puede usar cada uno de los modelos anteriores teniendo en cuenta las condiciones y rangos de validez, o también directamente, usando la gráfica ajustada de viscosidad vs. gravedad °API a diferentes series de temperaturas (figura 30).

### **6.3 VALIDACIÓN DE MODELOS DE CORRELACIÓN PROPUESTOS**

Por otra parte, con el propósito de determinar la validez de los modelos propuestos, en el ejemplo de la tabla 20 para una temperatura de 150 °F se establece una comparación con los valores de viscosidad determinados tanto

en laboratorio como los hallados a partir de estos utilizando interpolación exponencial con los valores que arrojan los modelos generados, obteniéndose un porcentaje error promedio absoluto de 4,69% (las demás comparaciones para cada una de las temperaturas y su correspondiente porcentaje de error absoluto promedio se encuentran especificadas en las tablas del anexo C); la validez se hace usando como parámetro de confiabilidad el promedio del porcentaje de error absoluto o discrepancia entre dicha comparación para cada uno de los modelos planteados, con el fin de concluir el grado de aproximación que tienen los modelos de correlación generados.

**Tabla 20:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio

$\mu_{OD} = -4423,3^{\circ}\text{API} + 40920 \quad R^2=0,9515$			
T = 150 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
7444	6860,59	7,7	7,8
5788	6418,26	7,8	10,9
5643	5533,6	8	1,9
4973	5091,27	8,1	2,4
4227	4206,61	8,3	0,5
3551	3764,28	8,4	6,0
3500	3321,95	8,5	5,1
2511	2437,29	8,7	2,9

**Fuente:** Autores del Proyecto.

Analizando los valores que toman los promedios del porcentaje de error absoluto para cada uno de los modelos generados que se encuentran en las tablas del anexo C (anexo C-1 hasta el anexo C-7), es válido afirmar que dichos modelos tienen gran confiabilidad si se tiene en cuenta que de acuerdo a una revisión en la literatura el porcentaje promedio del error absoluto para las

correlaciones de viscosidad que existen, oscila aproximadamente entre un 5 y 25 %<sup>16</sup>.

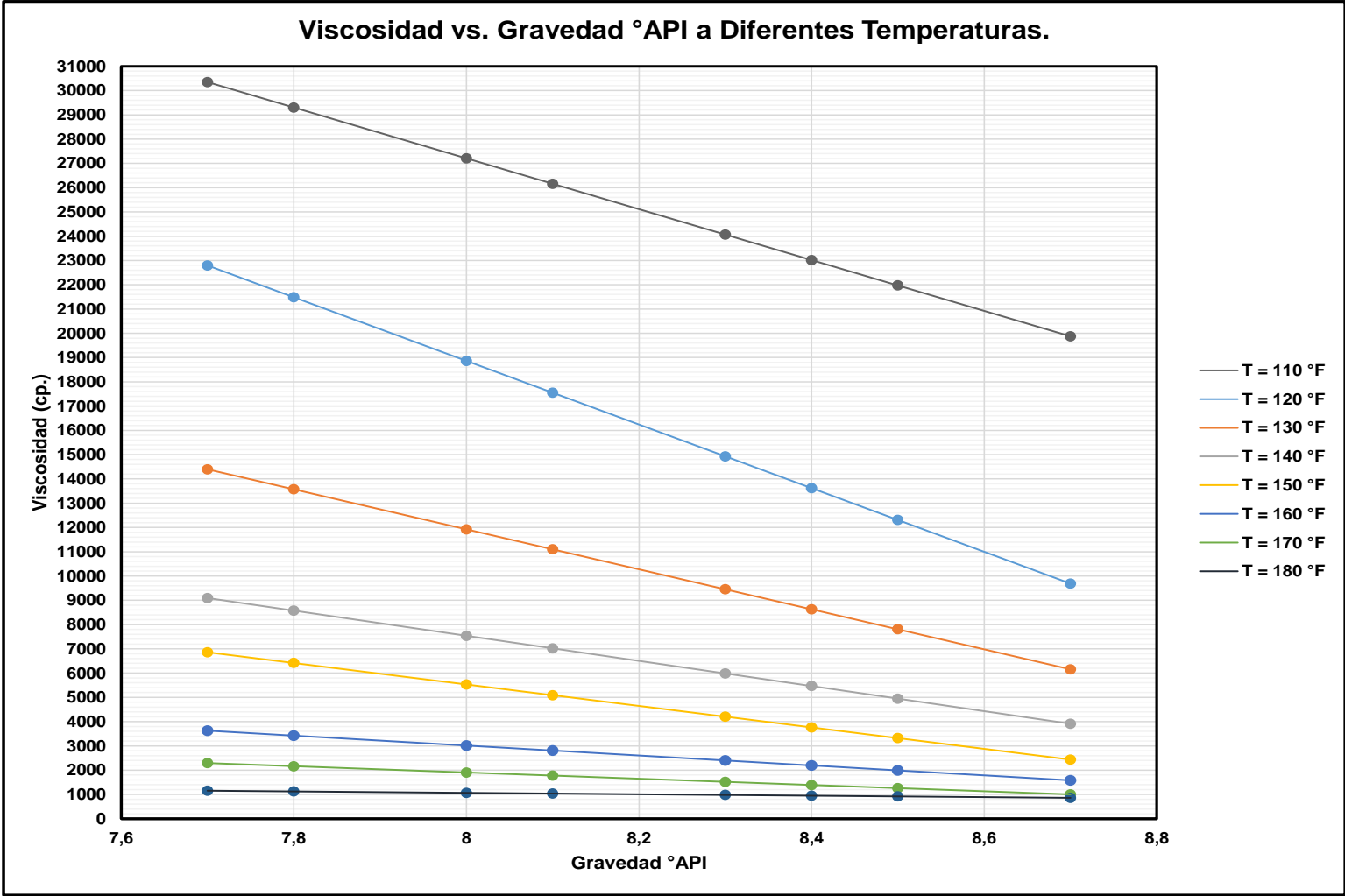
Otro buen indicio es que los coeficientes de determinación  $R^2$ , para cada uno de los modelos se encuentra en promedio alrededor de 0,90 el cual es un valor muy cercano a 1.

Además, otro criterio que indica que tanto los datos obtenidos en la toma de pruebas de laboratorio como los modelos de correlación generados a partir de éstas, tienen un grado de confiabilidad aceptable, es que expertos y conocedores del Campo del cual se obtuvieron las muestras de crudo extrapesado afirman que ya está establecido por regla del dedo gordo la viscosidad del crudo muerto a una temperatura de 180 °F se encuentra entre 1000 y 1500 cp; en la tabla 13 anteriormente mostrada (consolidado de resultados de las pruebas de laboratorio) se puede apreciar que los datos obtenidos para generar el modelo de correlación para  $T = 180$  °F a diferentes gravedades °API, efectivamente los valores de viscosidad oscilan entre dicho rango.

---

<sup>16</sup> BANZER, CARLOS., op. cit., p.77.

**Figura 30:** Ajuste comportamiento de la viscosidad en función de la gravedad °API a diferentes temperaturas



Fuente: Autores del proyecto.

La figura 30, es una gráfica en la cual se relacionan tres propiedades de un crudo muerto y extrapesado: tal gráfica, permite determinar la viscosidad (cp.) para éste tipo de crudo en función de la gravedad °API, a una temperatura específica y dentro de unos rangos definidos con cierto grado de precisión.

Los rangos definidos para la aplicación de la figura 30 son los valores extremos que toma cada una de las propiedades que conforman dicha figura: tales valores, se encuentran establecidos en la tabla 21.

**Tabla 21:** Rangos de aplicación de la figura 30

<b>PROPIEDAD</b>	Gravedad °API	Temperatura (°F)	Viscosidad (cp.)
<b>RANGO</b>	7,7-8,7	110-180	841-30.809

% Error promedio absoluto global = 6,97

**Fuente:** Autores del Proyecto

## 7. CONCLUSIONES

Para obtener un alto grado de confiabilidad de un modelo de correlación, no se debe limitar solamente a tener como base un gran número de datos, también, es fundamental analizar la calidad de éstos; por ejemplo, para el desarrollo de éste estudio a partir de las pruebas de laboratorio se seleccionaron un total de 24 datos, lo cuál no es una cantidad grande de datos, pero por los resultados que se obtuvieron de los modelos de correlación, se puede afirmar que la calidad éstos es aceptable.

De acuerdo a la revisión bibliográfica, los modelos que existen para determinar la viscosidad para éste tipo de crudos son muy pocos; por tanto, los modelos propuestos a partir del estudio realizado pueden convertirse en una gran herramienta para obtener un valor estimado de tal propiedad sin recurrir necesariamente, a realizar pruebas de laboratorio.

El porcentaje más bajo del error absoluto promedio se presenta en los modelos de viscosidad para  $T=110^{\circ}\text{F}$ ,  $T=150^{\circ}\text{F}$  y  $T=180^{\circ}\text{F}$  (1,63%, 4,69% y 2,71% respectivamente); esto se debe a que precisamente, a dichas temperaturas se llevaron a cabo las pruebas de laboratorio y los demás datos para el resto de temperaturas, fueron obtenidos generando la ecuación de la curva de ajuste de la gráfica que mejor representa el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura para cada muestra de crudo con diferente gravedad  $^{\circ}\text{API}$ .

En el momento en que se generaron las nuevas series de datos a partir de aquellos datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, se observa que para algunos casos a una misma temperatura al ser una muestra de crudo de gravedad  $^{\circ}\text{API}$  diferente, ciertos valores de viscosidad son iguales;

probablemente, se debe a que, el valor de la gravedad °API de las diferentes muestras de crudo que se tenían varía entre rangos muy mínimos.

## 8. RECOMENDACIONES

- Con el propósito de evaluar la precisión de las pruebas de laboratorio y los posteriores modelos de correlación para viscosidad obtenidos a partir de éstas, se recomienda generar nuevos modelos de viscosidad para crudos muertos y extrapesados con base por ejemplo, en la composición para posteriormente establecer una relación entre dichos modelos.
- Los modelos de correlación han sido propuestos a partir de una pequeña base de datos como resultado de pruebas de laboratorio; por tanto, se recomienda crear nuevos modelos de viscosidad de crudos muertos y extrapesados mediante un estudio similar, pero, contando con una mayor cantidad de datos para así obtener de los modelos resultantes mayores rangos de aplicación y aumentar el grado de precisión.
- Se recomienda desarrollar un estudio sobre la posibilidad de incluir otras propiedades y variables que afecten el comportamiento de la viscosidad del crudo muerto y extrapesado; esto con el fin de realizar un ajuste a los modelos de correlación propuestos y por consiguiente incrementar su exactitud.
- En el Campo del cual se obtuvieron las muestras de crudo, se recomienda probar los modelos de correlación propuestos para así establecer si es viable utilizar permanentemente tales modelos para estimar la viscosidad de éste tipo de crudo.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBOUDWAREJ, Hussein y SHAW, Félix. La importancia del petróleo pesado Otoño de (2006). {en línea}. Oilfield Review. SCHLUMBERGER. Disponible en:

[http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish06/heavy\\_oil.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish06/aut06/heavy_oil.pdf).

BANZER, Carlos. Correlaciones Numéricas PVT. 1996. Universidad del Zulia.

BAUMEISTER, Alberto J y DA SILVA, Ismael. Situación a nivel de recursos humanos y materiales en los futuros proyectos para producir crudo extrapesado de la Faja Petrolífera del Orinoco. 2010. ANALES de la Universidad Metropolitana.

CUBIDES, Laura y PEÑA, Paula. Sensibilidad de las variables operacionales en el transporte de crudo. Bucaramanga, 2009. Trabajo de grado (Ingeniería de petróleos). Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímicas.

DE GHETTO, Giambattista y PAONE, Francesco. Pressure-Volume-Temperature Correlations for Heavy and Extra Heavy Oils. 1995. SPE-30316-MS, presentado en la SPE conference, Calgary..

GUTIERREZ P, Humberto y DE LA VARAS, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2008. Guanajuato: McGraw-Hill/Interamericana editores, 126-134 pág.

HERNÁNDEZ, Roberto y FERNÁNDEZ, Carlos. Metodología de la investigación. 1997.

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO. Desarrollo de tecnologías para transporte de crudos pesados. 2013. {en línea} Disponible en: <http://energiaenmexico.notimex.com.mx/nota/170136>.

M.S, Hossain y SARICA, C. Assessment and Development of Heavy Oil Viscosity Correlations. 2005. SPE-97907-MS, presentado en la SPE conference, Calgary.

MACHICAO B, Nilton Horacio. Estadística aplicada. 2003. Lima: Editorial Universidad Tecnológica del Perú. 108-112 pág.

MURILLO S, Julio Cesar y YEPEZ R, Carla Fernanda. Recopilación de los análisis P.V.T y análisis convencional de núcleos para la generación y estandarización de correlaciones para los campos del área Auca. 2013. Quito, Trabajo de grado (Ingeniería de petróleos). Escuela politécnica nacional. Escuela de ingeniería en Geología y petróleos.

Nota técnica GPA 63. Introducción a los crudos pesados y extrapesados: Clasificación, explotación, transporte y refinación. 2013. ESTUDIOS Y SERVICIOS PETROLEROS S.R.L.

Nota técnica GPA 75. Viscosidad y estructura en crudos pesados de la C.G.S.J. 2013. ESTUDIOS Y SERVICIOS PETROLEROS S.R.L.

ORTUÑO, Luis, PLÁCIDO N y RODRÍGUEZ, L. Correlación de viscosidad para crudo muerto, pesado y extrapesado, de la Faja Petrolífera del Orinoco. 2011. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UCV-Escuela de Química y Petróleo.

PERTUZ, Mauricio y PINO, Gian Carlo. Ajuste de modelos de viscosidad de crudo vivo para crudos extrapesados. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado (Ingeniería de petróleos). Universidad industrial de Santander. Facultad de fisicoquímicas.

PINEDA, Cesar Augusto; ARENAS, Félix. Guía laboratorio de fluidos. Determinación de la viscosidad de un crudo. Bucaramanga, 2009. Universidad industrial de Santander. Escuela de ingeniería de petróleos.

SAAVEDRA, Néstor Fernando .Crudos pesados en Colombia, retos y oportunidades. 2010. ECOPETROL S.A.

SECCOMBE James y JOHANNES, Ronald. Ranking Oil Viscosity in Heavy Oil Reservoirs. 2005. SPE-97935-MS, presentado en la SPE conference, Calgary. Noviembre.

THAKUR, Ganesh C. Heavy Oil Reservoir Management. Ganesh C. Thakur (Chevron Petroleum Technology Co). 2003. SPE-39233-MS, presentado en la SPE conference, Rio de Janeiro.

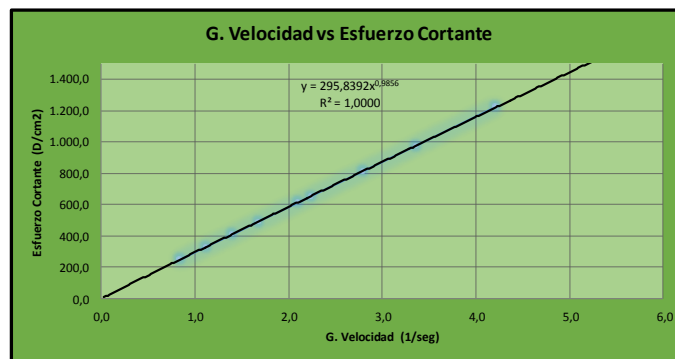
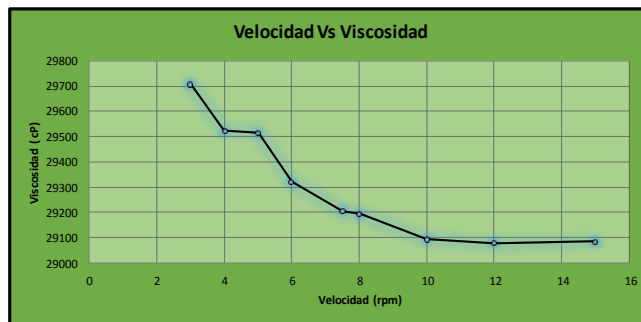
TORRES MÉNDEZ, Ángel Luis; PÉREZ SOLÓRZANO y CLARITZA, Elena. Correlación Para La Estimación de La Viscosidad De Petróleo Muerto, Como Función De °API, Temperatura Y Las Fracciones Obtenidas De La Destilación. 2008. Biblioteca Central UDO-Monagas.

# **ANEXOS**

## ANEXO A. REPORTES DE RESULTADOS Y CÁLCULOS A PARTIR DE PRUEBAS DE LABORATORIO

**Anexo A-1:** Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=7,7 @ 110°F

RESULTADOS TEMPERATURA DE 110°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	3	29707,9	17,8	249,5	1
STEP 2	4	29522,6	23,6	330,7	1
STEP 3	5	29512,2	29,5	413,3	1
STEP 4	6	29319,5	35,2	492,6	2
STEP 5	7,5	29204,5	43,8	613,3	2
STEP 6	8	29195,4	46,7	654,0	2
STEP 7	10	29091,0	58,2	814,5	3
STEP 8	12	29079,7	69,8	977,0	3
STEP 9	15	29082,6	87,4	1224,1	4

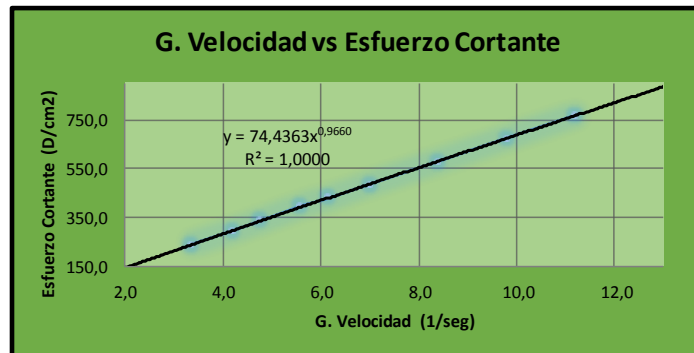
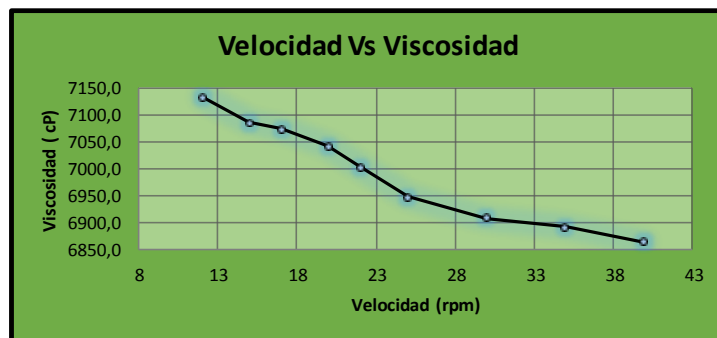


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 110°F		
<b>n</b>	<b>0,9856</b>	
<b>μ</b>	<b>30809</b>	<b>cp</b>
<b>% Aproximación</b>	<b>99,96</b>	<b>%</b>

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-2: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=7,7 @ 150°F**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 150°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	12	7132,5	17,1	239,7	3
STEP 2	15	7085,1	21,3	297,6	4
STEP 3	17	7074,6	24,1	336,7	5
STEP 4	20	7041,4	28,2	394,3	6
STEP 5	22	7002,0	30,8	431,3	6
STEP 6	25	6946,6	34,7	486,3	7
STEP 7	30	6907,2	41,4	580,2	8
STEP 8	35	6890,9	48,2	675,3	10
STEP 9	40	6864,1	54,9	768,8	11

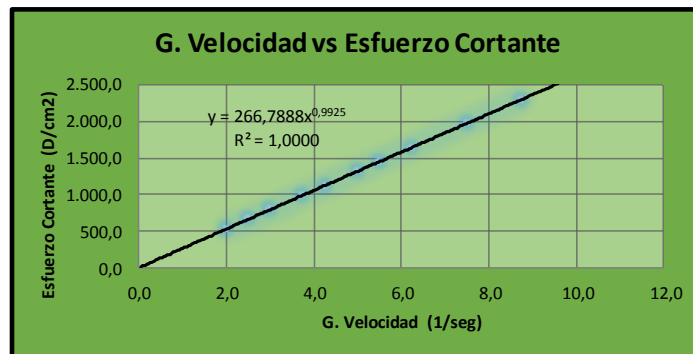
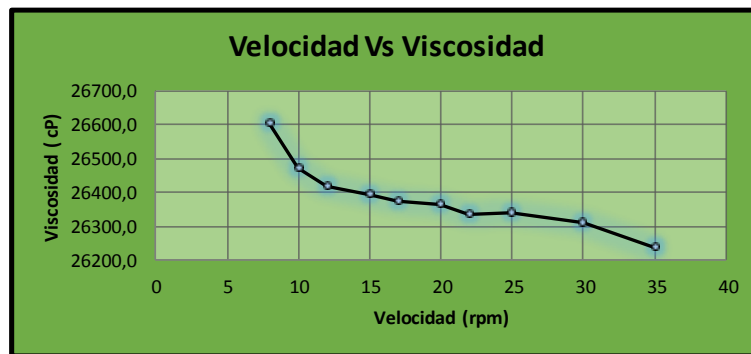


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 150°F		
n	0,9660	
μ	7444	cp
% Aproximación	99,94	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-3: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad °API=8  
@ 110°F**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 110°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	8	26606,1	21,3	532,1	2
STEP 2	10	26472,3	26,5	661,8	3
STEP 3	12	26418,3	31,6	790,3	3
STEP 4	15	26395,5	39,4	985,9	4
STEP 5	17	26374,0	44,8	1120,9	4
STEP 6	20	26364,1	52,8	1319,0	5
STEP 7	22	26335,0	57,9	1446,8	5
STEP 8	25	26340,4	65,9	1646,3	6
STEP 9	30	26311,8	79,0	1976,1	8
STEP 10	35	26237,4	91,8	2295,8	9

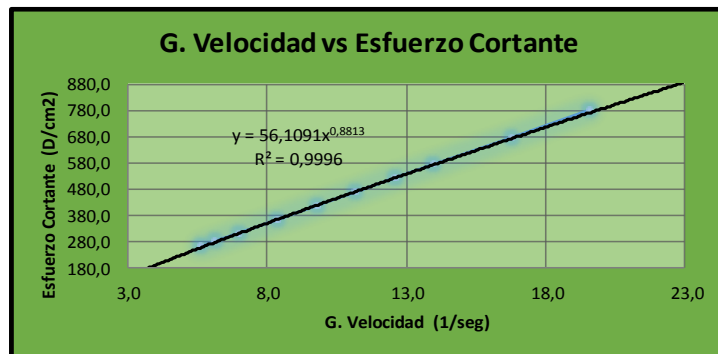
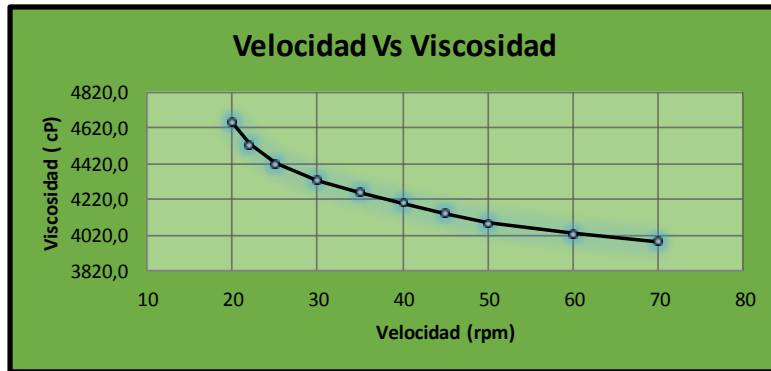


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 110°F		
n	0,9925	
μ	26679	cp
% Aproximación	99,91	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-4: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad °API=8  
@ 150°F**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 150°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	20	4648,0	18,6	260,3	6
STEP 2	22	4527,6	19,9	278,9	6
STEP 3	25	4420,7	22,1	309,4	7
STEP 4	30	4325,2	26,0	363,3	8
STEP 5	35	4257,2	29,8	417,2	10
STEP 6	40	4200,3	33,6	470,4	11
STEP 7	45	4142,0	37,3	521,9	13
STEP 8	50	4084,2	40,8	571,8	14
STEP 9	60	4026,6	48,3	676,5	17
STEP 10	70	3981,2	55,7	780,3	20

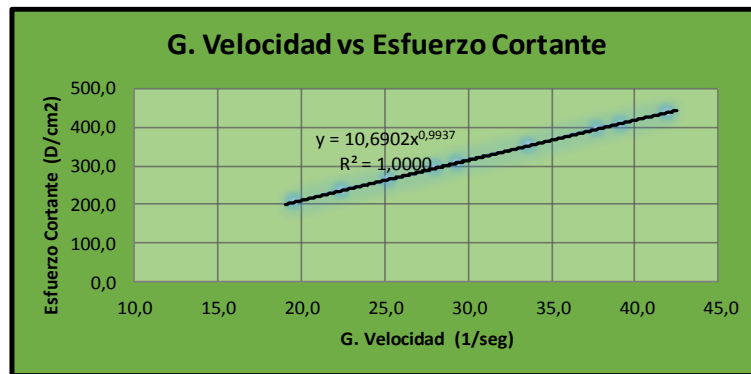
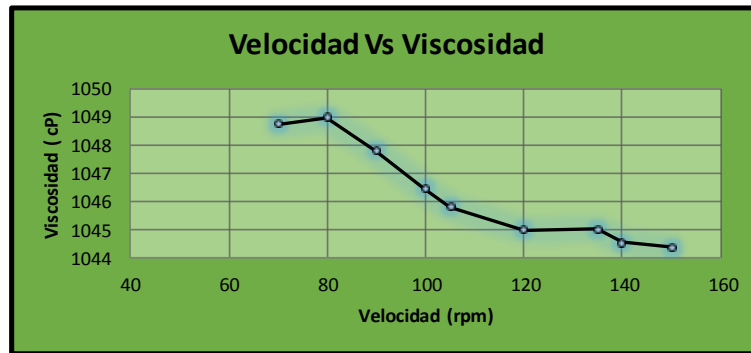


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 150°F		
n	0,8813	
μ	5788	cp
% Aproximación	99,87	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-5: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad °API=8  
@ 180°F**

<b>RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F</b>					
<b>STEP</b>	<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>Viscosidad (cp)</b>	<b>Torque / Par (%)</b>	<b>Esf.Cortante (D/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>G.Velocidad (1/seg)</b>
STEP 1	70	1048,76	14,68	205,56	20
STEP 2	80	1048,97	16,78	234,97	22
STEP 3	90	1047,79	18,86	264,04	25
STEP 4	100	1046,47	20,93	293,01	28
STEP 5	105	1045,82	21,93	307,06	29
STEP 6	120	1044,98	25,08	351,11	34
STEP 7	135	1045,01	28,22	395,02	38
STEP 8	140	1044,55	29,22	409,15	39
STEP 9	150	1044,36	31,33	438,63	42

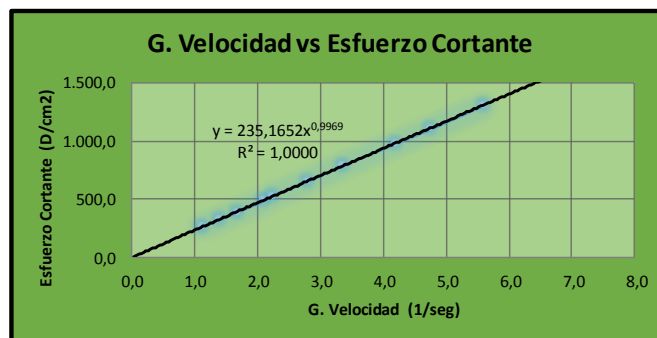
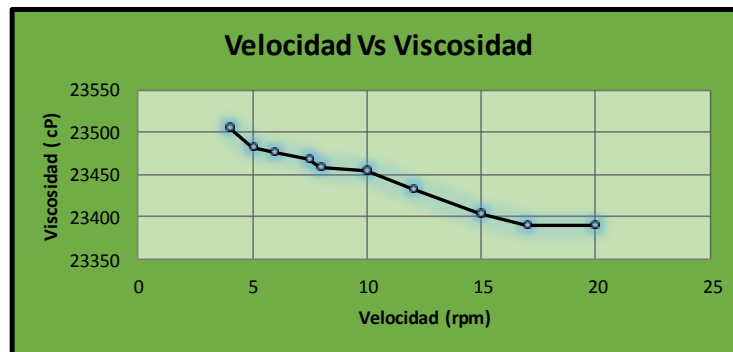


<b>RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 180°F</b>		
<b>n</b>	<b>0,9937</b>	
<b>μ</b>	<b>1069</b>	<b>cp</b>
<b>% Aproximación</b>	<b>99,93</b>	<b>%</b>

**Fuente: Autores del Proyecto**

**Anexo A-6: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=8,3 @ 110°F (primer muestra)**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 110°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	4	23506,2	18,6	259,9	1
STEP 2	5	23483,3	23,4	327,7	1
STEP 3	6	23476,9	28,1	393,6	2
STEP 4	7,5	23469,5	35,2	492,9	2
STEP 5	8	23458,7	37,4	524,0	2
STEP 6	10	23455,8	46,7	653,6	3
STEP 7	12	23433,2	56,2	787,4	3
STEP 8	15	23405,1	70,2	983,0	4
STEP 9	17	23390,7	79,5	1113,4	5
STEP 10	20	23390,2	93,6	1309,8	6

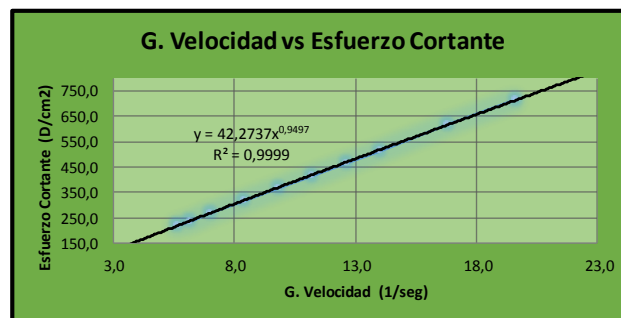
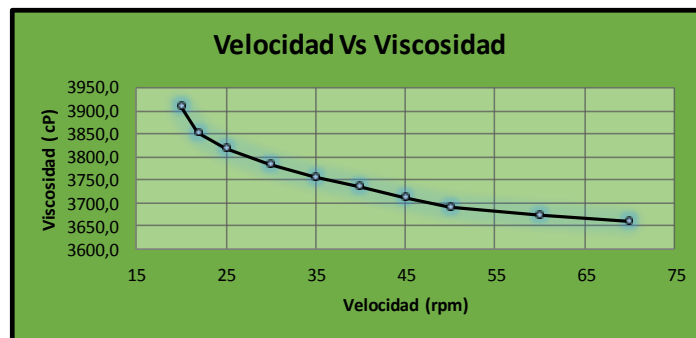


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 110°F		
n	0,9969	
μ	23517	cp
% Aproximación	99,96	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-7: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=8,3 @ 150°F (primer muestra)**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 150°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	20	3912,1	15,6	219,1	6
STEP 2	22	3854,6	17,0	237,4	6
STEP 3	25	3821,1	19,1	267,5	7
STEP 4	30	3786,4	22,7	318,1	8
STEP 5	35	3758,6	26,3	368,3	10
STEP 6	40	3735,9	29,9	418,4	11
STEP 7	45	3712,3	33,4	467,7	13
STEP 8	50	3694,0	36,9	517,2	14
STEP 9	60	3674,3	44,1	617,3	17
STEP 10	70	3660,2	51,2	717,4	20

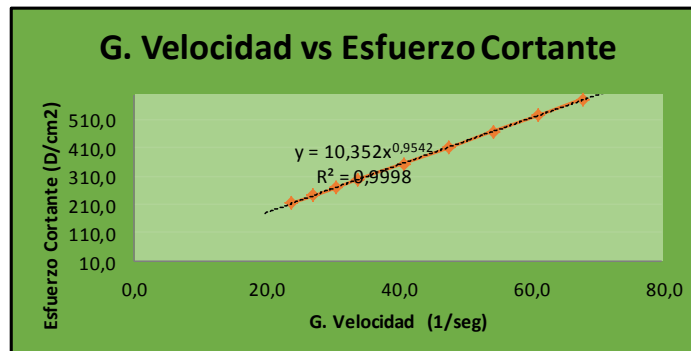
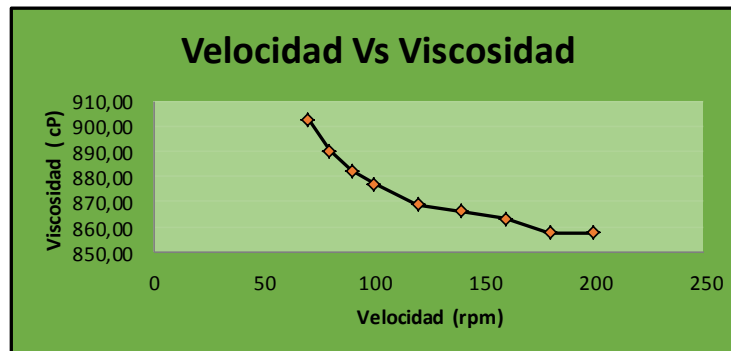


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 150°F		
n	0,9497	
μ	4227	cp
% Aproximación	99,91	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-8: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=8,3 @ 180°F (primer muestra)**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	60	909,18	21,82	185,47	20
STEP 2	70	902,59	25,27	214,82	24
STEP 3	80	890,24	28,49	242,14	27
STEP 4	90	882,28	31,76	269,98	31
STEP 5	100	876,91	35,08	298,15	34
STEP 6	120	868,75	41,70	354,45	41
STEP 7	140	866,06	48,50	412,24	48
STEP 8	160	863,37	55,26	469,67	54
STEP 9	180	857,49	61,74	524,79	61
STEP 10	200	857,61	68,61	583,17	68

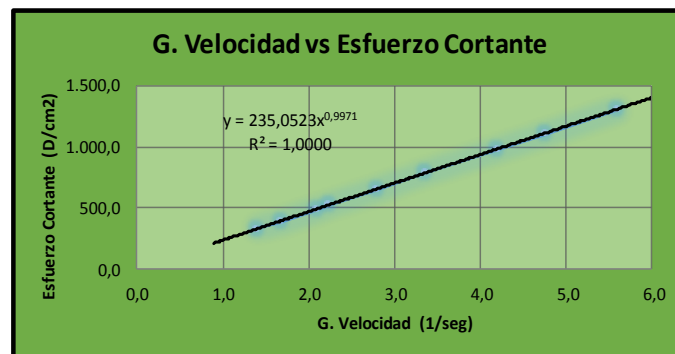
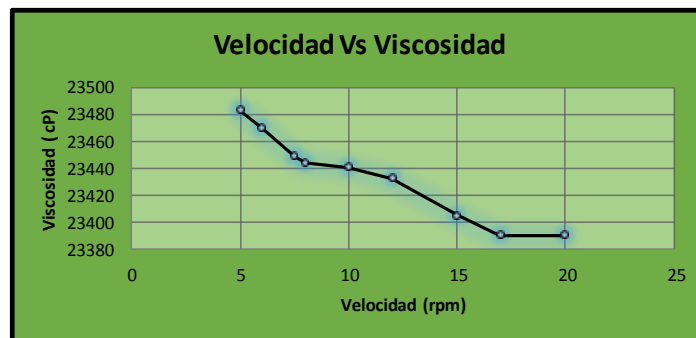


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 180°F		
K'	10,3520	
n	0,9542	
$\mu$	1056	cp
% Aproximación	99,96	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-9: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=8,3 @ 110°F (segunda muestra)**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 110°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	4	23808,2	18,6	259,9	1
STEP 2	5	23483,3	23,4	327,7	1
STEP 3	6	23470,9	28,1	393,6	2
STEP 4	7,5	23449,5	35,2	492,9	2
STEP 5	8	23444,7	37,4	524,0	2
STEP 6	10	23441,0	46,7	653,6	3
STEP 7	12	23433,2	56,2	787,4	3
STEP 8	15	23405,1	70,2	983,0	4
STEP 9	17	23390,7	79,5	1113,4	5
STEP 10	20	23390,2	93,6	1309,8	6

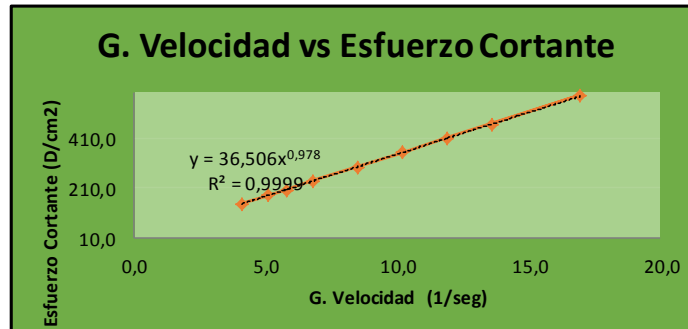
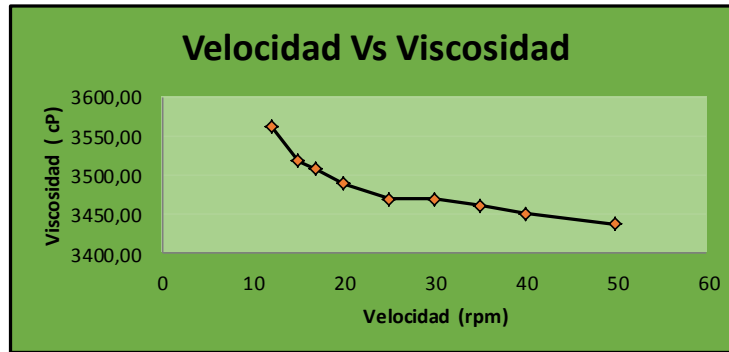


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 110°F		
n	0,9971	
μ	23505	cp
% Aproximación	100,00	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-10: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=8,3 @ 150°F (segunda muestra)**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 150°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	10	3631,34	14,53	123,47	3
STEP 2	12	3562,73	17,10	145,36	4
STEP 3	15	3517,29	21,10	179,38	5
STEP 4	17	3507,47	23,85	202,73	6
STEP 5	20	3488,22	27,91	237,20	7
STEP 6	25	3469,23	34,69	294,88	9
STEP 7	30	3469,22	41,63	353,86	10
STEP 8	35	3460,56	48,45	411,81	12
STEP 9	40	3449,59	68,99	586,43	17
STEP 10	50	3436,42	54,98	467,35	14

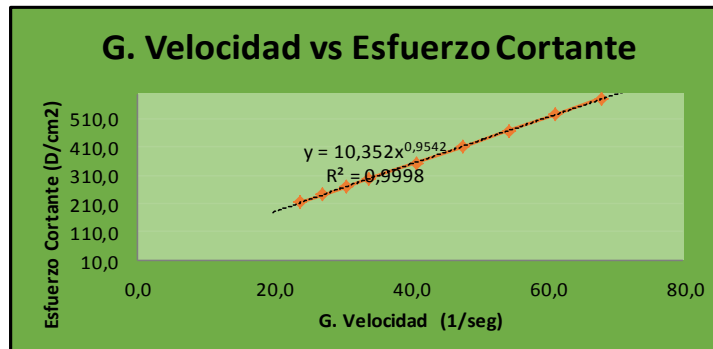
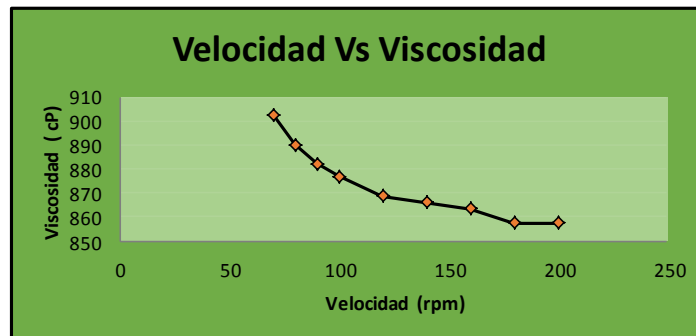


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 150°F		
K'	36,5060	
n	0,9780	
μ	3651	cp
% Aproximación	99,35	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-11: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad  
°API=8,3 @ 180°F (segunda muestra)**

RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	60	909,18	21,82	185,47	20
STEP 2	70	902,59	25,27	214,82	24
STEP 3	80	890,24	28,49	242,14	27
STEP 4	90	882,28	31,76	269,98	31
STEP 5	100	876,91	35,08	298,15	34
STEP 6	120	868,75	41,70	354,45	41
STEP 7	140	866,06	48,50	412,24	48
STEP 8	160	863,37	55,26	469,67	54
STEP 9	180	857,49	61,74	524,79	61
STEP 10	200	857,61	68,61	583,17	68

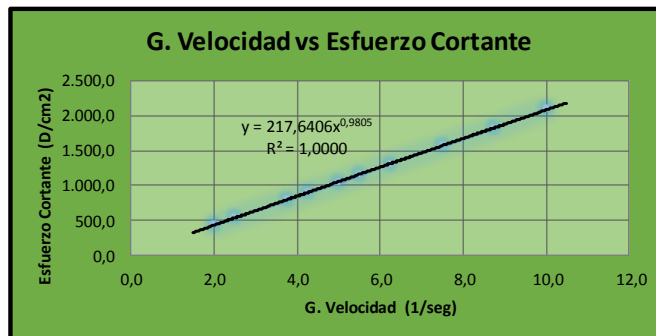
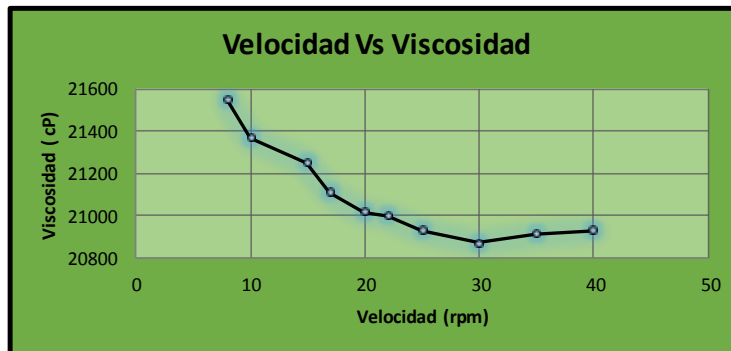


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 180°F		
K'	10,3520	
n	0,9542	
μ	1035	cp
% Aproximación	99,96	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-12: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad**  
 °API=8,5 @ 110°F

RESULTADOS TEMPERATURA DE 110°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	8	21552,22	17,24	431,04	2
STEP 2	10	21371,37	21,37	534,28	3
STEP 3	15	21256,91	31,89	797,13	4
STEP 4	17	21115,01	35,90	897,39	4
STEP 5	20	21015,72	42,03	1050,79	5
STEP 6	22	21006,07	46,21	1155,33	6
STEP 7	25	20930,12	52,33	1308,13	6
STEP 8	30	20870,64	62,61	1565,30	8
STEP 9	35	20916,18	73,21	1830,17	9
STEP 10	40	20932,09	83,73	2093,21	10

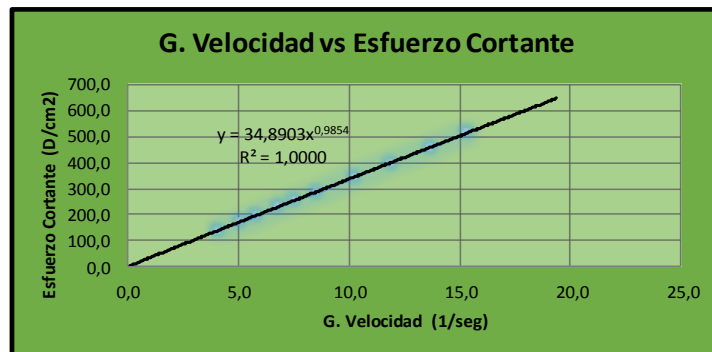
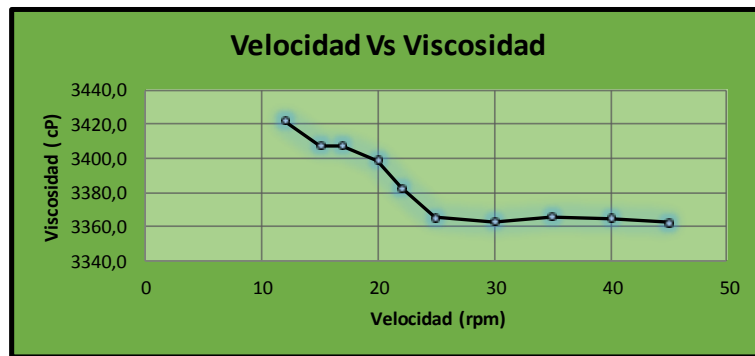


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 110°F		
n	0,9805	
μ	21764	cp
% Aproximación	99,97	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-13: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad**  
 °API=8,5 @ 150°F

RESULTADOS TEMPERATURA DE 150°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	12	3422,2	16,4	139,6	4
STEP 2	15	3407,7	20,4	173,8	5
STEP 3	17	3408,1	23,2	197,2	6
STEP 4	20	3399,0	27,2	231,1	7
STEP 5	22	3382,8	29,8	253,0	7
STEP 6	25	3365,3	33,7	286,1	9
STEP 7	30	3362,9	40,4	343,0	10
STEP 8	35	3365,9	47,1	400,6	12
STEP 9	40	3364,6	54,0	458,8	14
STEP 10	45	3362,0	60,7	515,9	15

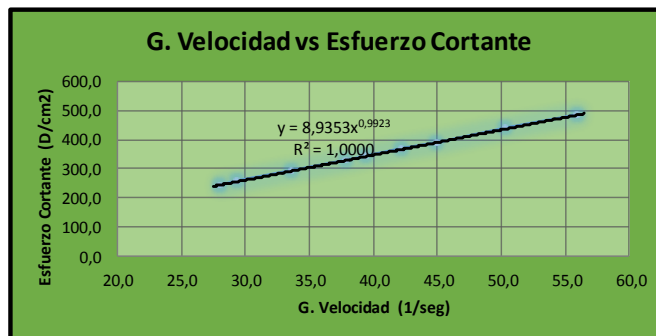
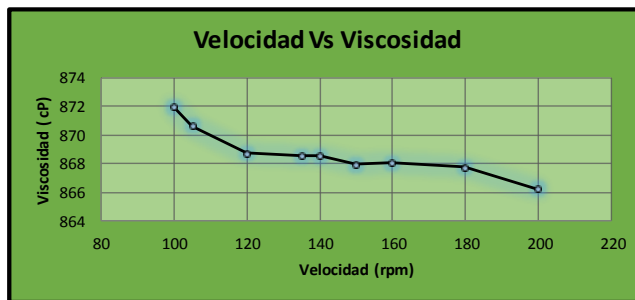


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 150°F		
n	0,9854	
μ	3500	cp
% Aproximación	99,98	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-14: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad**  
 °API=8,5 @ 180°F

RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	100	871,95	17,44	244,15	28
STEP 2	105	870,62	18,28	255,96	29
STEP 3	120	868,71	20,85	291,89	34
STEP 4	135	868,48	23,50	329,04	38
STEP 5	140	868,47	24,45	342,24	39
STEP 6	150	867,93	26,19	366,63	42
STEP 7	160	868,03	27,85	389,95	45
STEP 8	180	867,77	31,24	437,35	50
STEP 9	200	866,23	34,65	485,09	56

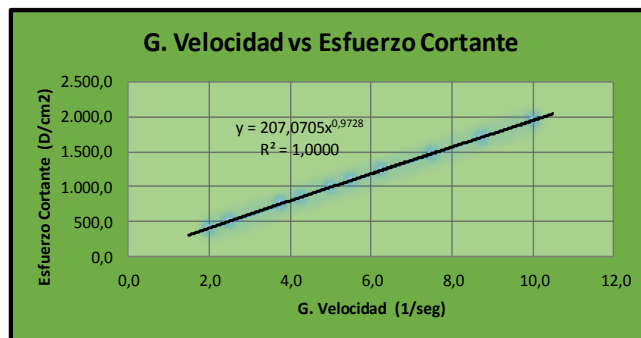
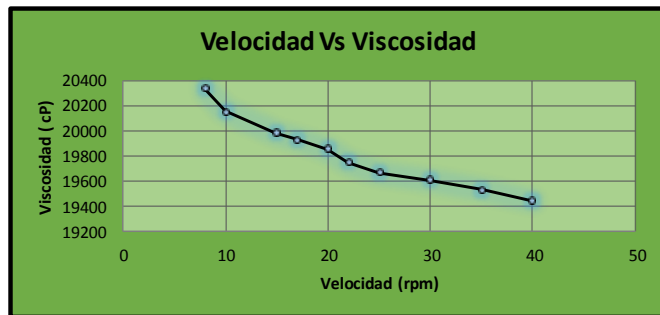


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 180°F		
n	0,9923	
μ	894	cp
% Aproximación	99,99	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-15: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad**  
 °API=8,7 @ 110°F

RESULTADOS TEMPERATURA DE 110°F					
STEP	Velocidad (rpm)	Viscosidad (cp)	Torque / Par (%)	Esf.Cortante (D/cm <sup>2</sup> )	G.Velocidad (1/seg)
STEP 1	8	20335,55	16,27	406,71	2
STEP 2	10	20157,94	20,16	503,95	3
STEP 3	15	19988,31	29,98	749,56	4
STEP 4	17	19930,04	33,88	847,03	4
STEP 5	20	19853,40	39,71	992,67	5
STEP 6	22	19749,21	43,45	1086,21	6
STEP 7	25	19668,47	49,17	1229,28	6
STEP 8	30	19611,78	58,84	1470,88	8
STEP 9	35	19531,83	68,36	1709,03	9
STEP 10	40	19440,52	77,76	1944,05	10

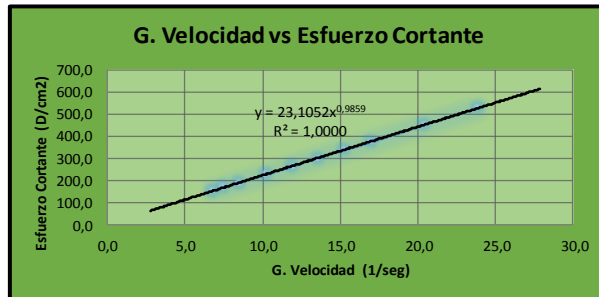
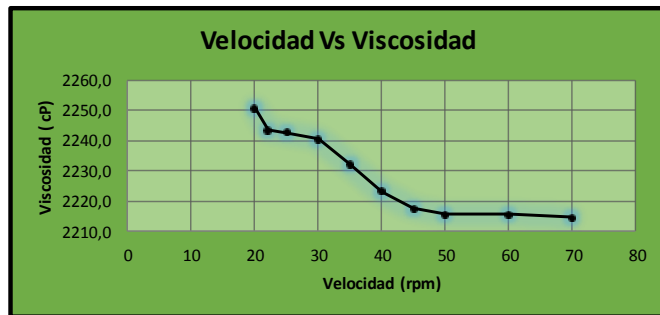


RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 110°F		
n	0,9728	
μ	20707	cp
% Aproximación	99,80	%

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo A-16: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad**  
 °API=8,7 @ 150°F

<b>RESULTADOS TEMPERATURA DE 150°F</b>					
<b>STEP</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Viscosidad</b>	<b>Torque / Par</b>	<b>Esf.Cortante</b>	<b>G.Velocidad</b>
	<b>(rpm)</b>	<b>(cp)</b>	<b>(%)</b>	<b>(D/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>(1/seg)</b>
STEP 1	20	2250,8	18,0	153,1	7
STEP 2	22	2243,4	19,7	167,8	7
STEP 3	25	2242,6	22,4	190,6	9
STEP 4	30	2240,5	26,9	228,5	10
STEP 5	35	2232,0	31,2	265,6	12
STEP 6	40	2223,0	35,6	302,3	14
STEP 7	45	2217,5	39,9	339,3	15
STEP 8	50	2215,4	44,3	376,6	17
STEP 9	60	2215,5	53,2	452,5	20
STEP 10	70	2214,5	62,1	528,3	24

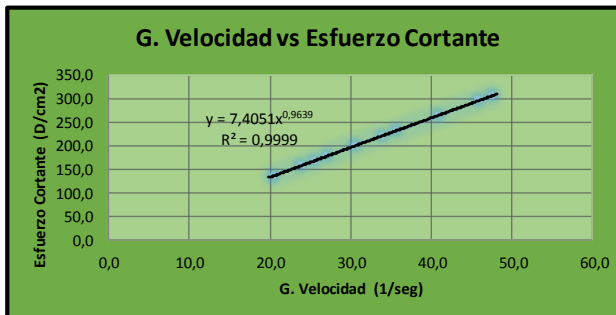
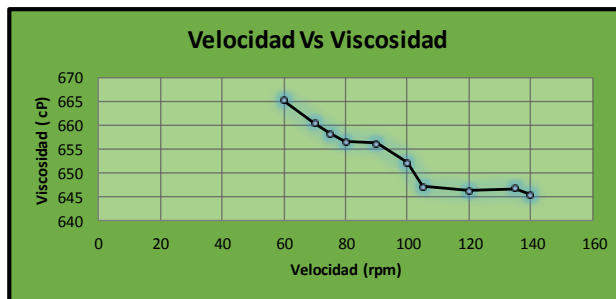


<b>RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 150°F</b>		
<b>n</b>	<b>0,9859</b>	
<b>μ</b>	<b>2511</b>	<b>cp</b>
<b>% Aproximación</b>	<b>99,89</b>	<b>%</b>

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo A-17: Prueba de viscosidad para muestra de crudo de gravedad**  
 °API=8,7 @ 180°F

<b>RESULTADOS TEMPERATURA DE 180°F</b>					
<b>STEP</b>	<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>Viscosidad (cp)</b>	<b>Torque / Par (%)</b>	<b>Esf.Cortante (D/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>G.Velocidad (1/seg)</b>
STEP 1	60	665,18	15,96	135,70	20
STEP 2	70	660,54	18,50	157,21	24
STEP 3	75	658,33	19,75	167,87	26
STEP 4	80	656,53	21,01	178,58	27
STEP 5	90	656,25	23,63	200,81	31
STEP 6	100	652,11	26,08	221,72	34
STEP 7	105	647,17	27,18	231,04	36
STEP 8	120	646,30	31,02	263,69	41
STEP 9	135	646,67	34,92	296,82	46
STEP 10	140	645,27	36,14	307,15	48

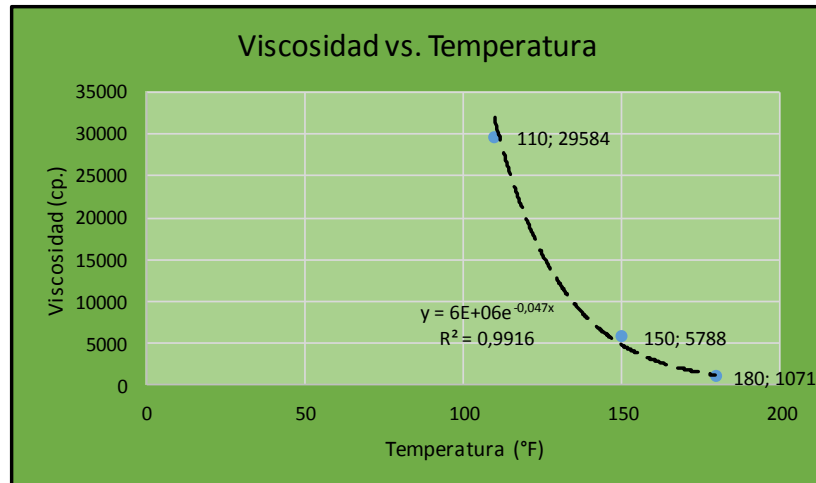


<b>RESULTADOS DE VISCOSIDAD @ 180°F</b>		
<b>n</b>	<b>0,9639</b>	
<b>μ</b>	<b>841</b>	<b>cp</b>
<b>% Aproximación</b>	<b>99,98</b>	<b>%</b>

**Fuente:** Autores del Proyecto

## ANEXO B. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PARA OBTENER NUEVAS SERIES DE DATOS

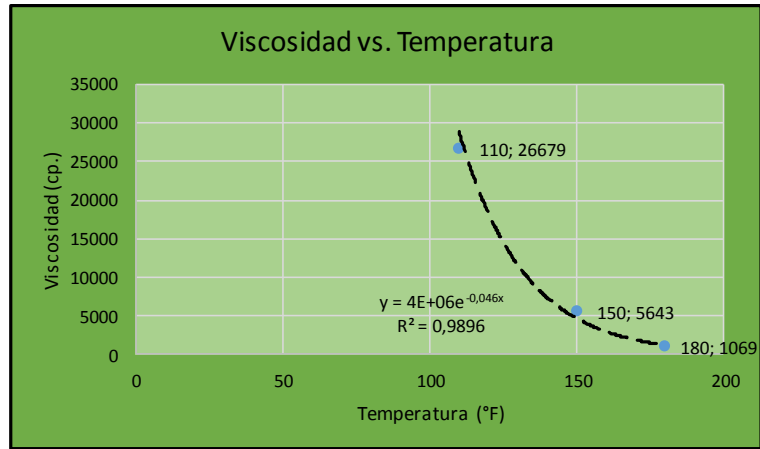
**Anexo B-1:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=7,8



$Y = 6E+06e^{-0,046X}$	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
24039,08	120
15175,69	130
9580,30	140
3818,04	160
2410,30	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

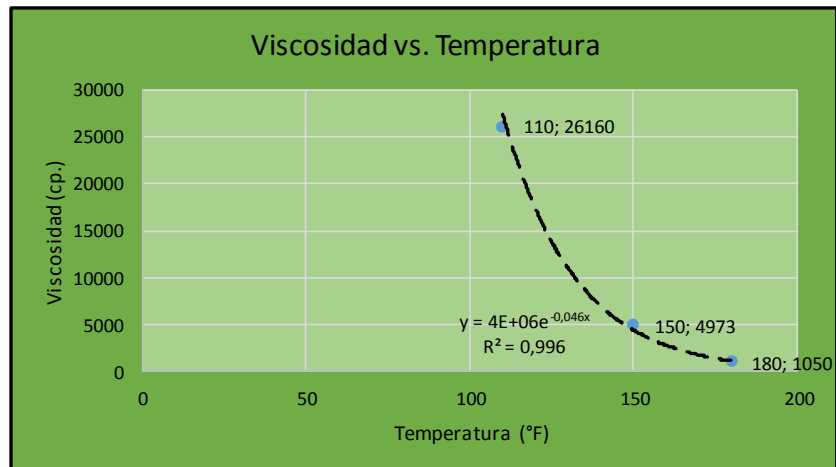
**Anexo B-2:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=8



Y = 4E+06e-0,046X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
16026,05	120
10117,13	130
6386,86	140
2545,36	160
1606,86	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

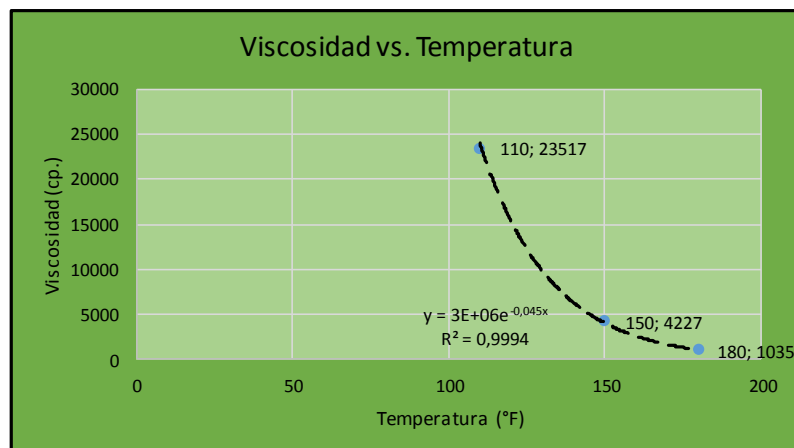
**Anexo B-3:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=8,1



Y = 4E+06e-0,046X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
16026,05	120
10117,13	130
6386,86	140
2545,36	160
1606,86	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

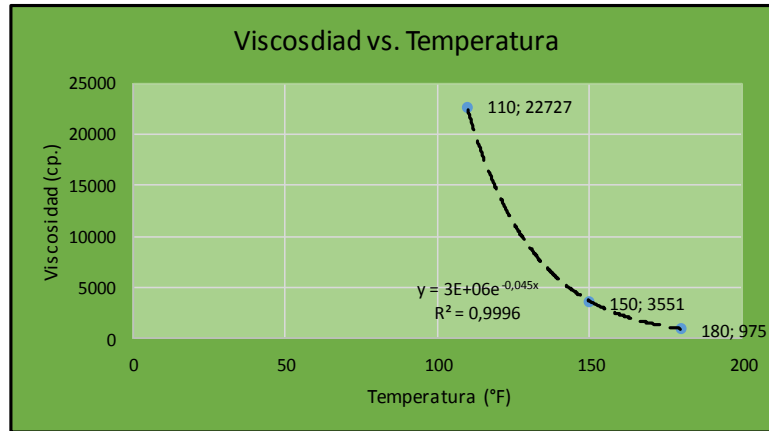
**Anexo B-4:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=8,3



Y = 3E+06e-0,045X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
13551,95	120
8641,22	130
5509,96	140
2240,24	160
1428,46	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

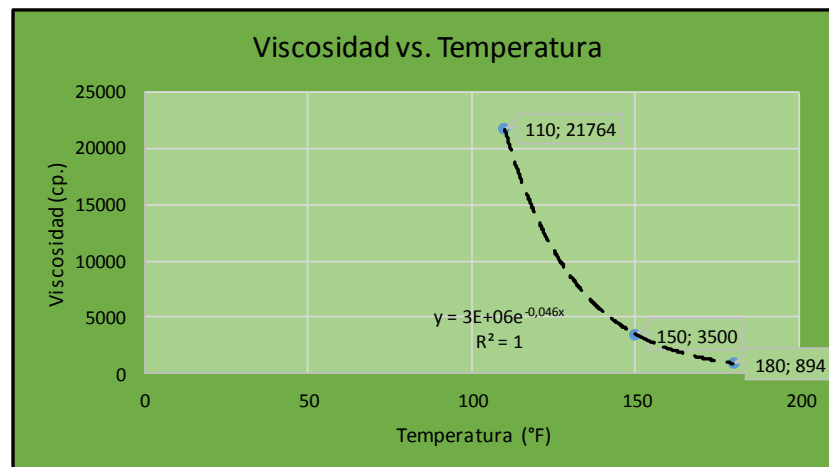
**Anexo B-5:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=8,4



Y = 3E+06e-0,045X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
13551,95	120
8641,22	130
5509,96	140
2240,24	160
1428,46	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

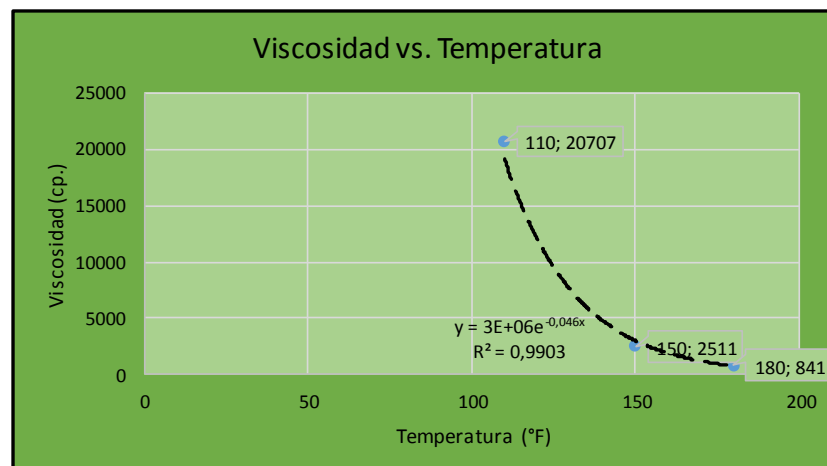
**Anexo B-6:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=8,5



Y = 3E+06e-0,046X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
12019,54	120
7587,84	130
4790,15	140
1909,02	160
1205,15	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo B-7:** Curva exponencial ajustada para obtener nuevas series de datos de viscosidad y temperatura para una gravedad °API=8,7



Y = 3E+06e-0,046X	
Viscosidad (cp.)	Temperatura (°F)
Y	X
12019,54	120
7587,84	130
4790,15	140
1909,02	160
1205,15	170

**Fuente:** Autores del Proyecto

**ANEXO C. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PARA ESTABLECER  
GRADO DE CONFIABILIDAD A PARTIR DEL PORCENTAJE  
ERROR ABSOLUTO PROMEDIO**

**Anexo C-1:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 110°F

<b><math>\mu_{OD} = -10469^{\circ}\text{API} + 110960 \quad R^2 = 0,9822</math></b>			
<b>T = 110 °F</b>			
<b>Viscosidad (cp.)</b>	<b>Viscosidad "modelo"(cp.)</b>	<b>°API</b>	<b>% Error</b>
30809	30348,7	7,7	1,5
29584	29301,8	7,8	1,0
26679	27208	8	2,0
26160	26161,1	8,1	0,0
23517	24067,3	8,3	2,3
22727	23020,4	8,4	1,3
21764	21973,5	8,5	1,0
20707	19879,7	8,7	4,0
<b>% Error absoluto Promedio</b>		<b>1,63</b>	

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo C-2:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 120°F

$\mu OD = -13103^{\circ}API + 123687 \quad R^2 = 0,8492$			
T = 120 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
24039,08192	22793,9	7,7	5,2
24039,08192	21483,6	7,8	10,6
16026,05461	18863	8	17,7
16026,05461	17552,7	8,1	9,5
13551,94564	14932,1	8,3	10,2
13551,94564	13621,8	8,4	0,5
12019,54096	12311,5	8,5	2,4
12019,54096	9690,9	8,7	19,4
<b>% Error absoluto Promedio</b>			<b>9,44</b>

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo C-3:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 130°F

$\mu OD = -8238,7^{\circ}API + 77835 \quad R^2 = 0,85$			
T= 130 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
15175,68942	14397,01	7,7	5,1
15175,68942	13573,14	7,8	10,6
10117,12628	11925,4	8	17,9
10117,12628	11101,53	8,1	9,7
8641,21904	9453,79	8,3	9,4
8641,21904	8629,92	8,4	0,1
7587,844708	7806,05	8,5	2,9
7587,844708	6158,31	8,7	18,8
<b>% Error absoluto Promedio</b>			<b>9,32</b>

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo C-4:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 140°F

$\mu_{OD} = -5180^{\circ}\text{API} + 48978 \quad R^2 = 0,8506$			
T = 140 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
9580,2972	9092	7,7	5,1
9580,2972	8574	7,8	10,5
6386,8648	7538	8	18,0
6386,8648	7020	8,1	9,9
5509,959206	5984	8,3	8,6
5509,959206	5466	8,4	0,8
4790,1486	4948	8,5	3,3
4790,1486	3912	8,7	18,3
<b>% Error absoluto Promedio</b>			<b>9,32</b>

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo C-5:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 160°F

$\mu_{OD} = -2047,4^{\circ}\text{API} + 19391 \quad R^2=0,851$			
T = 160 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
3818,036593	3626,02	7,7	5,0
3818,036593	3421,28	7,8	10,4
2545,357729	3011,8	8	18,3
2545,357729	2807,06	8,1	10,3
2240,242934	2397,58	8,3	7,0
2240,242934	2192,84	8,4	2,1
1909,018297	1988,1	8,5	4,1
1909,018297	1578,62	8,7	17,3
<b>% Error absoluto Promedio</b>			<b>9,33</b>

**Fuente:** Autores del Proyecto

**Anexo C-6:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 170°F

$\mu_{OD} = -1287,1^{\circ}\text{API} + 12201 \quad R^2=0,8508$			
T = 170 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
2410,297436	2290,33	7,7	5,0
2410,297436	2161,62	7,8	10,3
1606,864	1904,2	8	18,5
1606,864	1775,49	8,1	10,5
1428,461312	1518,07	8,3	6,3
1428,461312	1389,36	8,4	2,7
1205,148718	1260,65	8,5	4,6
1205,148718	1003,23	8,7	16,8
<b>% Error absoluto Promedio</b>			<b>9,33</b>

Fuente: Autores del Proyecto

**Anexo C-7:** Comparación de valores para establecer grado de confiabilidad a partir del porcentaje error absoluto promedio para curva de T = 180°F

$\mu_{OD} = -291,13^{\circ}\text{API} + 3397,7 \quad R^2= 0,8944$			
T = 180 °F			
Viscosidad (cp.)	Viscosidad "modelo"(cp.)	°API	% Error
1177	1155,999	7,7	1,8
1071	1126,886	7,8	5,2
1069	1068,66	8	0,0
1050	1039,547	8,1	1,0
1035	981,321	8,3	5,2
975	952,208	8,4	2,3
894	923,095	8,5	3,3
841	864,869	8,7	2,8
<b>% Error absoluto Promedio</b>			<b>2,71</b>

Fuente: Autores del Proyecto