

**EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PRODUCEN LAS VÁLVULAS  
REGULADORAS DE FLUJO (VRF) EN LA VISCOSIDAD DEL POLIMERO EN  
UN PROCESO DE RECOBRO MEJORADO PARA EL CAMPO YARIGUÍ**

**FREDY ALEXÁNDER CÁRDENAS GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PRODUCEN LAS VÁLVULAS  
REGULADORAS DE FLUJO (VRF) EN LA VISCOSIDAD DEL POLIMERO EN  
UN PROCESO DE RECOBRO MEJORADO PARA EL CAMPO YARIGUÍ**

**FREDY ALEXÁNDER CÁRDENAS GONZÁLEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Magíster en Ingeniería de Petróleos y Gas**

**Director**

**RÓBINSON JIMÉNEZ DÍAZ**

**Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander, la Escuela de Ingeniería de Petróleos y su personal docente, por contribuir a la formación de excelentes profesionales.

Al Grupo de Investigación de Recobro Mejorado UIS-ECP, por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto de grado y de generar oportunidades de avanzar en el área de la investigación.

Al M.Sc. Róbinson Jiménez, por su asesoría en el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados, y toda la colaboración en la dirección de este proyecto.

A los Ingenieros Rubén, Mayra, Julia y Gustavo, por su respaldo, tiempo y orientación durante todo el desarrollo del proyecto.

A mis Jefes en ECOPETROL, por permitir disponer del tiempo necesario para dedicarle a esta maestría.

A todos mis compañeros de la maestría, por sus conocimientos, por su ayuda, por la amistad y respeto que me brindaron durante este tiempo de estudio.

## DEDICATORIA

Dios y la Virgen me acompañan en cada momento de mi vida, este logro nuevamente es gracias a todas las bendiciones que me dan.

A mis Padres, a mi Esposa, a mi Hermano, a toda mi Familia, pero como siempre al mejor regalo de mi vida “MI JUANITA”. Cuando algún día leas esta dedicatoria, sé que te sentirás aún más orgullosa de ser la hija del que ahora se convierte en Magíster en Ingeniería de Petróleos.

Fredy

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	18
1 INYECCION DE POLIMEROS .....	20
1.1 DESCRIPCION DEL PROCESO DE INYECCION DE POLIMERO .....	22
1.2 CARACTERISTICAS PRICIPALES DE LOS POLIMEROS .....	23
1.2.1 Tipos de polímero para recobro mejorado .....	24
1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DEGRADACION DEL POLIMERO .....	28
1.3.1 Tipos de degradación .....	28
1.3.2 Efecto sobre la viscosidad .....	31
1.4 MODELOS REOLÓGICOS .....	34
1.4.1 Modelo de Ley de Potencia.....	36
1.4.2 Modelo de Múltiples parámetros (EOR – Polímeros) .....	38
2 VALVULAS REGULADORAS DE FLUJO .....	41
2.1 INYECCION SELECTIVA .....	41
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	43
2.3 CONJUNTOS QUE INTEGRAN LA VALVULA REGULADORA DE FLUJO .....	46
2.3.1 Latch o cuerpo de pesca.....	46
2.3.2 Cuerpo Dinámico .....	47
2.3.3 Cuerpo de anclaje.....	49
2.4 TIPOS DE VALVULAS.....	50
2.4.1 Válvulas Reguladoras de Flujo .....	51
2.4.2 Válvulas Dummies .....	51
2.4.3 Válvulas de Circulación (VFO).....	51
3 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	53
3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES PRELIMINARES.....	53
3.1.1 Determinación del porcentaje de humedad en muestras solidas de HPAM .....	53
3.1.2 Preparación de salmuera .....	54
3.1.2 Preparación de solución madre .....	54
3.2 PROTOCOLO DE MEDICION DE LA DEGRADACION MECANICA DEL POLIMERO SEGÚN NORMA API RP 63 .....	57

3.3 DISEÑO DEL NUEVO PROTOCOLO DE MEDICION DE LA DEGRADACION MECANICA DEL POLIMERO EN VALVULAS REGULADORAS DE FLUJO .....	59
3.3.1 Descripción del montaje del banco de prueba experimental.....	59
3.3.2 Procedimiento de medición de viscosidad del polímero .....	61
3.3.3 Procedimiento para el desplazamiento de solución polimérica a través de la válvula reguladora de flujo. ....	62
4 DISEÑO EXPERIMENTAL APLICADO AL CAMPO YARIGUI.....	69
4.1 DEFINICION DE VARIABLES INDEPENDIENTES .....	69
4.1.1 Salinidad agua de inyección .....	69
4.1.2 Concentración del polímero .....	70
4.1.3 Temperatura .....	70
4.1.4 Presión de desplazamiento.....	70
4.1.5 Configuración del cuerpo dinámico de la válvula reguladora de flujo .....	71
4.2 CONFIGURACION DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	71
5 ANALISIS DE RESULTADOS.....	73
5.1 RESULTADOS DEGRADACIÓN DE POLÍMERO BANCO DE PRUEBA EXPERIMENTAL .....	73
5.2 MODELO MATEMÁTICO.....	81
5.2.1 Modelo matemático concentración de polímero 300 ppm.....	83
5.2.2 Modelo matemático concentración de polímero 500 ppm.....	85
5.2.3 Modelo matemático concentración de polímero 800 ppm.....	87
6 INYECCION DE POLIMERO CAMPO YARIGUI.....	90
6.1 GENERALIDADES CAMPO YARIGUI.....	90
6.2 IMPLEMENTACION PILOTO INYECCION DE POLIMERO CAMPO YARIGUI .....	92
6.2.1 Facilidades de inyección .....	93
6.2.2 Monitoreo y seguimiento .....	94
6.2.3 Patrones de inyección de polímero piloto Yariguí .....	96
6.2.4 Configuración estado mecánico pozos inyectora polímero .....	99
6.2.5 Resultados del Piloto .....	101
6.3 ANALISIS COMPARATIVO DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA INYECCION DE POLIMERO USANDO VALVULAS REGULADORAS DE FLUJO .....	103
7 CONCLUSIONES.....	108
8 RECOMENDACIONES .....	110

BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXOS.....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Avance del frente de agua y agua con polimero.....	21
Figura 2. Proceso inyección polimero.....	23
Figura 3. Tipos de polímeros.....	24
Figura 4. Estructura química del HPAM.....	26
Figura 5. Estructura química del Xantan.....	27
Figura 6. Degradación del polimero en presencia de Hierro y Oxígeno.....	29
Figura 7. Degradación del polimero en presencia de Hierro y Oxígeno.....	30
Figura 8. Viscosidad vs. Concentración para diferentes polímeros.....	32
Figura 9. Efecto de una solución altamente ionizada sobre la poliacrilamida hidrolizada.....	33
Figura 10. Viscosidad del polímero en función de la salinidad de la solución polimérica.....	34
Figura 11. Tipos de fluidos y sus características.....	36
Figura 12. Comportamiento de la viscosidad para un fluido No-Newtoniano en función de la tasa de corte usando la Ley de Potencia.....	38
Figura 13. Comportamiento de la viscosidad para un fluido No-Newtoniano según el Modelo de Ellis.....	40
Figura 14. Comportamiento de la viscosidad para un fluido No-Newtoniano según el Modelo de Carreau.....	40
Figura 15. Diagrama esquemático de Eficiencia vertical por la inyección de agua en un yacimiento heterogéneo.....	42
Figura 16. Diagrama sarta de inyección convencional y sarta de inyección selectiva en un yacimiento heterogéneo.....	42
Figura 17. Configuración sarta de inyección selectiva.....	44
Figura 18. Flujo a través de la válvula reguladora de flujo.....	45
Figura 19. Diferencial mínimo de presión en el regulador de la válvula reguladora de flujo.....	46

Figura 20. Componentes cuerpo de pesca de la válvula reguladora de flujo ....	47
Figura 21. Componentes cuerpo dinámico de la válvula reguladora de flujo ....	48
Figura 22. Cuerpo de anclaje de la válvula reguladora de flujo .....	50
Figura 23. Equipo de medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas.....	58
Figura 24. Esquema de medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de válvulas reguladoras de flujo.....	60
Figura 25. Configuración equipo de medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de válvulas reguladoras de flujo. ....	61
Figura 26. Equipo de medición de viscosidad.....	62
Figura 27. Validación medición de viscosidad inicial concentración 300 ppm. .	74
Figura 28. Validación medición de viscosidad inicial concentración 500 ppm. .	74
Figura 29. Validación medición de viscosidad inicial concentración 800 ppm. .	74
Figura 30. Validación medición de viscosidad final concentración 300 ppm.....	75
Figura 31. Validación medición de viscosidad final concentración 500 ppm.....	75
Figura 32. Validación medición de viscosidad final concentración 800 ppm.....	75
Figura 33. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF a una concentración de 300 ppm. ....	77
Figura 34. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF a una concentración de 500 ppm. ....	78
Figura 35. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF a una concentración de 800 ppm. ....	78
Figura 36. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF variando concentración de polímero. ....	79
Figura 37. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF en función de la tasa de corte (Shear rate). ....	81
Figura 38. Ajuste datos experimentales para concentración de polímero FP3230 de 300 ppm. ....	84
Figura 39. Modelo matemático para concentración de polímero FP3230 de 300 ppm.....	85

Figura 40. Ajuste datos experimentales para concentración de polímero FP3230 de 500 ppm. ....	86
Figura 41. Modelo matemático para concentración de polímero FP3230 de 500 ppm.....	87
Figura 42. Ajuste datos experimentales para concentración de polímero FP3230 de 800 ppm. ....	88
Figura 43. Modelo matemático para concentración de polímero FP3230 de 800 ppm.....	89
Figura 44. Mapa de localización del campo Yariguí.....	91
Figura 45. Historia de producción-inyección campo Yariguí. ....	92
Figura 46. Diagrama operacional piloto inyección polímero Yariguí. ....	94
Figura 47. Parámetros de inyección YR-504 .....	95
Figura 48. Parámetros de inyección YR-510 .....	96
Figura 49. Patrones de inyección Piloto Polímero .....	97
Figura 50. Correlación estructural, Patrón YR-504 .....	98
Figura 51. Correlación estructural, Patrón YR-510 .....	99
Figura 52. Estado mecánico sarta selectiva inyección, YR-504 .....	100
Figura 53. Estado mecánico sarta selectiva inyección, YR-510 .....	101
Figura 54. Respuesta producción piloto polímero Yariguí .....	102
Figura 55. Factor de recobro Vs Volumen poroso inyectado piloto polímero Yariguí. ....	103

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Configuración de cuerpo dinamico para regular un caudal especifico	49
Tabla 2. Diseño factorial .....	72
Tabla 3. Pruebas de desplazamiento de solución polimérica a través de válvulas reguladoras de flujo aplicado al campo Yariguí. ....	72
Tabla 4. Resultados pruebas de desplazamiento de solución polimérica a través de válvulas reguladoras de flujo aplicado al campo Yariguí.....	80
Tabla 5. Análisis ventajas y desventajas inyeccion de polimero sin regulación de flujo. ....	104
Tabla 6. Análisis ventajas y desventajas inyeccion de polimero con regulación de flujo. ....	105

## GLOSARIO

PAM = poliacrilamida

HPAM = poliacrilamida parcialmente hidrolizada

MD = millones de Dalton

$\lambda_i$  = movilidad de un fluido

M = relación de movilidad

$\mu_i$  = viscosidad

ppm = partes por millón

rpm = revoluciones por minuto

mm = milímetros

cm = centímetros

NaCl = cloruro de Sodio

N<sub>2</sub> = nitrógeno

$C_i$  = concentración en equilibrio

P = presión

T = temperatura absoluta

DPM = diferencial mínimo de presión

VRF = válvula reguladora flujo

VOF = válvula orificio fijo

VFO = válvula de circulación

VPI = volúmenes porosos inyectados

FR = factor de recobro.

°C = grados Celsius

cp = centipoises

$X_{pol}$  = masa de polímero

gr = gramos

mg = miligramos

L = litros

mL = mililitros

mg/L = miligramos por litro

$V_f$  = volumen de solución diluida

$V_i$  = volumen de solución madre

$C_f$  = concentración de solución diluida

$C_i$  = concentración de solución madre

%p/p = porcentaje peso – peso

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN DEL EFECTO QUE PRODUCEN LAS VÁLVULAS REGULADORAS DE FLUJO (VRF) EN LA VISCOSIDAD DEL POLÍMERO EN UN PROCESO DE RECOBRO MEJORADO PARA EL CAMPO YARIGUI\*.

**AUTOR:** FREDY ALEXÁNDER CÁRDENAS GONZÁLEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** POLÍMERO, INYECCIÓN DE QUÍMICOS, VÁLVULAS REGULADORAS DE FLUJO, INYECCIÓN SELECTIVA.

La inyección de polímero se presenta como una técnica para mejorar la eficiencia de recobro y desplazar el petróleo que la recuperación secundaria no ha logrado contactar.

Desde el año 2006, se ha ido incrementando el uso de sartas selectivas con válvulas reguladoras de flujo en los procesos de recobro secundario con el propósito de mejorar la eficiencia vertical de inyección; sin embargo, estas válvulas aún no han sido usadas en procesos de inyección de polímero por la falta de conocimiento que se tiene en relación al posible proceso de degradación que estas pueden ocasionar a la viscosidad de la solución polimérica, lo cual se asocia al aumento de la tasa de corte.

En este trabajo se lleva a cabo una evaluación del impacto de las válvulas reguladoras de flujo (VRF) en la degradación de las soluciones poliméricas. Seguidamente, se diseña un nuevo protocolo experimental de medición en laboratorio y, con los resultados obtenidos, se plantea un modelo matemático que representa los resultados experimentales. De forma complementaria, se efectúa un análisis de las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar válvulas reguladoras de flujo (VRF) en los procesos de recobro mejorado (particularmente, inyección de polímero) para el campo Yariguí.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Robinson Díaz Jiménez, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION EFFECT ON POLYMER VISCOSITY PRODUCED BY FLOW REGULATOR VALVES (VRF) WITHIN AN ENHANCED OIL RECOVERY PROCESS FOR THE YARIGUI FIELD\*

**AUTHOR:** FREDY ALEXANDER CARDENAS GONZALEZ\*\*

**KEYWORDS:** POLYMER, INJECTION OF CHEMICALS, FLOW REGULATING VALVES, SELECTIVE INJECTION.

Polymer injection is presented as a technique to improve recovery efficiency and to displace oil that secondary recovery has not contacted yet.

Since 2006, the use of selective strings with flow regulating valves has been increasing in secondary recovery processes to improve vertical injection efficiency. However, these valves have not been used in polymer injection processes yet, due to the lack of knowledge regarding the possible degradation that these can cause to the polymer solution viscosity, which is associated to shear rate increase.

This research evaluates flow regulating valves (VRF) impact in polymer solutions degradations. Afterwards, a new laboratory measurement experimental protocol was designed and implemented, which main objective was to build a mathematical model that stands for the experimental results obtained in the previous part. As a complement, a pros and cons analysis was carried out in order to evaluate the flow regulating valves (VRF) application in enhanced oil recovery processes (particularly, polymer injection) for the Yariguí field.

---

\* Master's thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Robinson Díaz Jiménez, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos.

## INTRODUCCION

La inyección de agua es el método de recuperación secundaria más usado en el mundo, sin embargo, este presenta baja eficiencia de barrido lo que ocasiona que un alto porcentaje de petróleo quede en el yacimiento.

La inyección de polímeros se presenta como una técnica para mejorar la eficiencia de recobro y desplazar el petróleo que la recuperación secundaria no ha contactado.

La eficiencia vertical del proceso de inyección es afectada por la heterogeneidad de la roca, por lo anterior el agua inyectada preferencialmente se mueve a las zonas de mejores propiedades, originando un pobre barrido vertical. Desde el año 2006 se ha incrementado el uso de sartas selectivas con válvulas reguladoras de flujo en los procesos de inyección de agua para controlar la cantidad de fluido que se quiere inyectar en cada zona del yacimiento, sin embargo en los procesos de inyección de polímero se presenta baja eficiencia vertical de inyección al no poder controlar la cantidad de solución polimérica que se quiere inyectar en las zonas del yacimiento dado que no ha sido evaluado el impacto en la degradación mecánica que esta puede presentar por el aumento de la tasa de corte al pasar a través del cuerpo dinámico de la válvula reguladora de flujo, lo que ocasiona una disminución en la viscosidad de la solución polimérica.

En ese sentido, este trabajo busca evaluar el impacto de las válvulas reguladoras de flujo (VRF) en el porcentaje de degradación de la viscosidad de las soluciones poliméricas, abordando el desarrollo en 6 secciones. En las dos primeras secciones se presentan las generalidades de la inyección de polímeros y el principio de funcionamiento de las válvulas reguladora de flujo en un proceso de inyección selectiva. Posteriormente se explica el protocolo experimental vigente para la evaluación de la degradación mecánica del polímero a condiciones de laboratorio y se plantea el diseño del nuevo

protocolo de medición de la degradación del polímero en válvulas reguladoras de flujo. En la sección 4 se plantea el diseño experimental aplicado a las condiciones de operación de campo Yariguí, para proceder en la siguiente sección a realizar un análisis de los resultados obtenidos en los desplazamientos de polímero a través de las válvulas reguladoras de flujo donde además se propondrán modelos matemáticos que representen los resultados obtenidos.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos durante la implementación de un piloto de inyección de polímeros en el campo Yariguí y se realiza un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de usar válvulas reguladoras de flujo en conjunto con la inyección de polímero.

## 1 INYECCION DE POLIMEROS

Dentro de los métodos de recobro mejorado, la inyección de polímeros se realiza como una modificación al proceso convencional de inyección de agua. En este se realiza la inyección de un fluido (agua) al cual se le adiciona un polímero el cual se diluye completamente logrando un aumento de la viscosidad de la solución acuosa, permitiendo generar un frente de desplazamiento mucho más estable.

Los polímeros logran dar una alta viscosidad a una solución acuosa, aun cuando se encuentran altamente diluidos; la inyección de polímeros aprovecha dichas capacidades para disminuir la relación de movilidad agua – petróleo mediante el aumento en la viscosidad del agua de inyección.

El valor agregado de adicionar polímero a una inyección de agua convencional puede ser explicado por la relación de movilidad la cual es definida en la **Ecuación 1**

$$\lambda = \frac{k}{\mu} \quad (1)$$

En donde  $\lambda$  es la movilidad del fluido,  $k$  la permeabilidad efectiva y  $\mu$  la viscosidad. La razón de movilidad agua-petróleo  $M$  se define como la movilidad del fluido desplazante sobre la movilidad del aceite, como se presenta en la **Ecuación 2**.

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o} = \frac{k_w \mu_o}{\mu_w k_o} \quad (2)$$

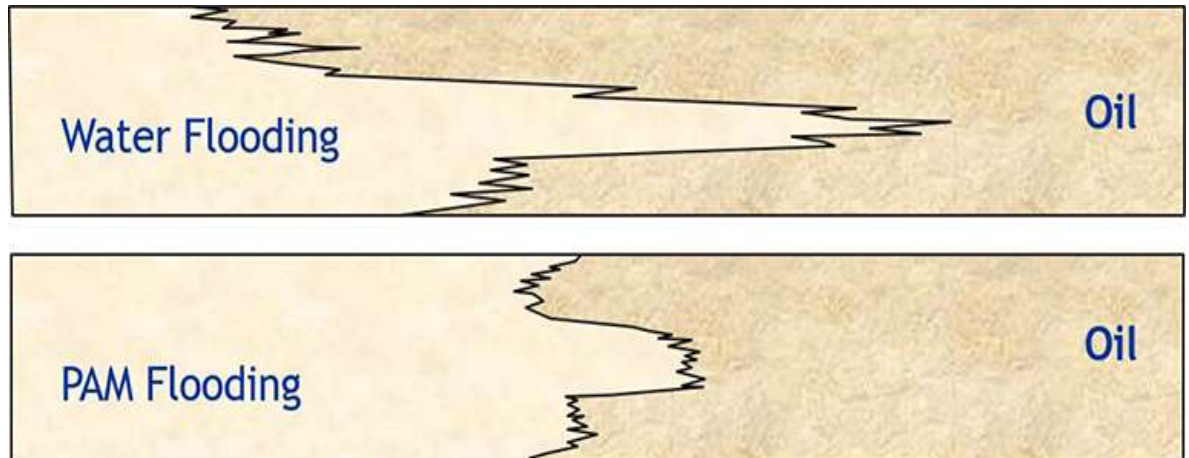
Donde  $\lambda_w$  y  $\lambda_o$  son la movilidad del agua y del aceite y  $k_w$  y  $k_o$  hacen relación a la permeabilidad efectiva de la fase agua y aceite. Cuando la relación de movilidad entre los dos fluidos en un proceso de inyección de agua es mayor o

igual a 5, la inyección de polímeros puede ser un buen candidato para mejorar dicha relación. El aumento en la viscosidad del agua disminuye la relación de movilidad; autores como Sorbie<sup>1</sup> plantean que valores menores o iguales a 1 son ideales, y que vistos en una dimensión se acercan a lo que sería un flujo tipo pistón sin fugas.

La inyección de polímero es comúnmente aplicada en dos casos<sup>2</sup>:

- Cuando la relación de movilidad durante un proceso de inyección de agua no es favorable, la inyección continua de polímero puede mejorar la eficiencia de barrido en el yacimiento.
- Incluso con una relación de movilidad favorable, si el yacimiento tiene cierto grado de heterogeneidad, la inyección de polímero puede ayudar a reducir la movilidad del agua en las capas de alta permeabilidad.

**Figura 1. Avance del frente de agua y agua con polímero.**



Fuente: Sorbie, K.S., 1991. Polymer-Improved Oil Recovery. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.

En el primer caso, se produce un desplazamiento macroscópico ineficaz que promueve un avance temprano del agua seguido de un largo período de

<sup>1</sup> SORBIE, Kenneth. "Polymer – Improved Oil Recovery". Heriot – Watt University, 1991.

<sup>2</sup> Willhite, G.P., Green, D.W. Enhanced Oil Recovery. SPE Textbook Series, 6. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, 1998.

producción en dos fases con cortes de agua cada vez mayores. Esta situación puede ser simplemente ilustrada por el concepto de canalización viscosa que se produce especialmente en yacimientos de petróleo pesado o cuando la relación de movilidad  $M$  es mayor que 1 ( $M > 1$ ) (Figura 1). Los cálculos de flujo fraccional ampliamente descritos en la bibliografía pueden ser útiles para visualizar los beneficios de la inyección de polímero y comparar casos simples.

El segundo caso comúnmente no es tenido en cuenta. Parece que, incluso si la relación de movilidad es igual o inferior a 1, la presencia de canales de alta permeabilidad o capas de yacimiento a gran escala y heterogeneidades pueden deteriorar en gran medida las eficiencias de barrido vertical y areal durante la inyección de agua. La presencia de capas de alta permeabilidad también conducirá a un avance temprano del agua, en estos casos se puede obtener una mejora significativa usando polímeros para aumentar la viscosidad del agua inyectada. Este aspecto se debe tener presente al seleccionar los candidatos para la inyección de polímero para no pasar por alto los yacimientos que contienen petróleos livianos<sup>3</sup>.

## **1.1 DESCRIPCION DEL PROCESO DE INYECCION DE POLIMERO**

La inyección de polímeros se basa en el aprovechamiento de la viscosidad de soluciones poliméricas para controlar la movilidad de los fluidos en el yacimiento. Según Sorbie (1991, 78), los polímeros se añaden al proceso de inyección de agua que se esté llevando a cabo con el fin de aumentar la viscosidad del fluido, lo cual permitirá mejorar la relación de movilidad agua–aceite en el yacimiento y conducirá al mejoramiento de la eficiencia de barrido areal y vertical.

---

<sup>3</sup> Sorbie, K.S., 1991. Polymer-Improved Oil Recovery. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.

Según Willhite & Green (1998, 239), este proceso consiste en adicionar al agua de inyección un tapón de polímero de 250 - 2000 ppm, de un alto peso molecular que oscile entre 2–4 Mlb/lb mol, antes de que ésta sea inyectada en el yacimiento; lo cual genera una solución muy viscosa a pesar de estar altamente diluida por lo que se recurre a inyectar un volumen que puede variar entre 0.1 a 0.3 volúmenes porosos, seguido por una inyección de agua convencional la cual ayudará a mantener un frente estable a medida que los fluidos avanzan en el yacimiento.

Un diagrama que representa el proceso de inyección de polímero se muestra en la Figura 2.

**Figura 2. Proceso inyección polímero.**



Fuente: WILLHITE, Paul & GREEN Don W. "Enhanced Oil Recovery". USA: SPE Textbook Series, 2003.

## 1.2 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS POLIMEROS

Un polímero es una molécula de cadena larga formada por grupos repetidos llamados monómeros. La reacción por la cual ellos se forman o se combinan

recibe el nombre de polimerización<sup>4</sup>. La siguiente expresión es una reacción de polimerización donde el monómero de etileno (CH<sub>2</sub>) se une con otro para formar el polímero:



Existe una gran cantidad de polímeros en la naturaleza, y su clasificación se basa según su origen natural o sintético (Figura 3). A pesar de que la principal característica de estos químicos es su poder viscosificante, es importante conocer la estructura de la molécula de polímero para entender fenómenos como el comportamiento de flujo en el medio poroso, adsorción/retención, y estabilidad mecánica y térmica<sup>5</sup>.

**Figura 3. Tipos de polímeros.**



Fuente: STRIGHT, J. The use of polymers for enhanced oil recovery a Review. Petroleum Recovery Institute. 2008.

**1.2.1 Tipos de polímero para recobro mejorado.** En los procesos de recobro mejorado se utilizan actualmente, dos tipos de polímeros, como son un material

<sup>4</sup> STRIGHT, J. The use of polymers for enhanced oil recovery a review. Petroleum recovery institute. 1976.

<sup>5</sup> SORBIE, Kenneth. "Polymer – Improved Oil Recovery". Heriot – Watt University, 1991.

sintético, poliacrilamida, en su forma parcialmente hidrolizada (HPAM), y un polímero producido de forma biológica conocido como la Goma Xantan<sup>6</sup>.

A nivel industrial son utilizados como agentes espesantes o como parte de los procesos de fabricación. Los polímeros son sensibles a la salinidad de la salmuera, dureza, y/o al ataque de las bacterias. Debido a estas limitaciones han surgido nuevos polímeros con mejoras en sus propiedades.

Un polímero es considerado de buena calidad cuando tiene las siguientes propiedades<sup>7</sup>:

- Sin presencia de Oxígeno en la cadena de carbonos para la estabilidad térmica
- Grupo hidrófilo iónico para reducir la adsorción en la superficie de la roca
- Buen poder viscosificante
- Grupo hidrófilo no-iónico para la estabilidad térmica

**Poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM):** En procesos de recobro mejorado el polímero que ha sido más utilizado a nivel mundial es el HPAM. Esto es debido a que este tipo de soluciones poliméricas presentan una mayor viscoelasticidad que las soluciones de Xantano.

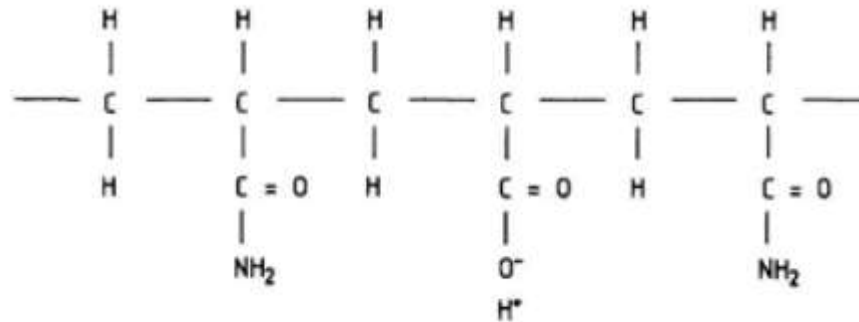
La poliacrilamida tiene alta adsorción en la roca por lo cual el polímero se hidroliza parcialmente con el fin de reducir la adsorción por la reacción de la poliacrilamida con una base, como el hidróxido de potasio. La hidrolisis convierte algunos de los grupos amida (CONH<sub>2</sub>) a grupos carboxilo (COO<sup>-</sup>), como se puede observar en la estructura de la Figura 4.

---

<sup>6</sup> JEANES, A., PITTSLEY, J. E., and SENTI, F.R.: "Polysaccharide B-1459: A new hydrocolloid polyelectrolyte produced from glucose by bacterial fermentation," J. App. Polymer Sci. 1961

<sup>7</sup> SHENG, James. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery. Theory and Practice. ELSEVIER. 2011. p.101.

**Figura 4. Estructura química del HPAM.**



Fuente: PANCHAROEN, Monrawee. "Physical Properties Of Associative Polymer Solutions". Stanford University, 2009.

El grado de hidrólisis es la fracción molar del grupo amida que se convierten por hidrólisis. Este rango va de 15 a 35% en productos comerciales. La hidrólisis de la poliacrilamida genera cargas negativas sobre la cadena principal del polímero que tiene un gran efecto sobre las propiedades reológicas de la solución polimérica.

Cuando la hidrólisis es mayor del 40% las cadenas flexibles son comprimidas y distorsionadas, y la viscosidad es reducida. Puede ocurrir floculación cuando la hidrólisis es mayor que el 40% con agua que tiene alto contenido Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>.

El HPAM no es tolerante a alta temperatura o alta salinidad (Wang et al., 2003). Las poliacrilamidas son sensibles a la sal, por lo tanto es deseable preparar estas soluciones en agua fresca (sólidos disueltos totales menores de 10000 ppm). Las poliacrilamidas pueden ser mecánicamente degradables por esfuerzos de corte; se debe tener cuidado en el manejo en superficie para evitar la degradación por esfuerzo de corte<sup>8</sup>.

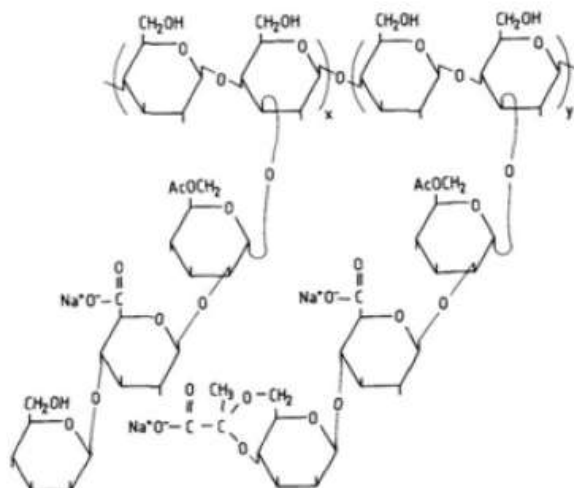
**Biopolímero Xantano:** Las gomas Xantano son relativamente insensibles a la salinidad y pueden tolerar los efectos de cizallamiento mecánicos que los

<sup>8</sup> CHANG, H.L. Polymer flooding technology –Yesterday, Today, and Tomorrow. August, 1978. p.1113.

hacen más fáciles de manejar en las bombas de inyección. La principal desventaja de la goma Xantan es la formación de un taponamiento característico y susceptible al ataque bacteriano. El taponamiento puede ser remediado por filtración o un procesamiento adicional. Bactericidas pueden ser adicionados para prevenir la degradación por las bacterias pero estas medidas incrementan los costos<sup>9</sup>.

La estabilidad a largo plazo para la goma Xantan a temperaturas de yacimiento superiores a 160°F no está aún demostrada para tiempos de residencia representativos de proyectos de recobro mejorado y ambientes de yacimiento. Debido a las diferencias entre los dos tipos de polímeros, fluido del yacimiento, características del tipo de roca y la concentración de sales de las aguas usadas en los campos para la preparación de la solución polimérica o la disponibilidad del agua fresca pueden influenciar fuertemente la selección del polímero a ser inyectado y es importante realizar un estudio y pruebas de laboratorio que permitan seleccionar el mejor desempeño. En la Figura 5 se presenta la estructura química del xantan.

**Figura 5. Estructura química del Xantan.**



Fuente: PANCHAROEN, Monrawee. "Physical Properties Of Associative Polymer Solutions". Stanford University, 2009.

<sup>9</sup> Ibid., p.2.

### 1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA DEGRADACION DEL POLIMERO

Una disminución en el peso molecular del polímero, una reacción química adversa durante su inyección, el paso a través de diámetros reducidos, puede constituir la degradación. Es importante determinar dónde ocurre la degradación del polímero ya sea en las facilidades de superficie, en el fondo del pozo de inyección o dentro del yacimiento. En cualquier caso, es primordial minimizar cualquier degradación potencial para mantener una viscosidad razonable de la solución polimérica inyectada durante la duración del proceso para maximizar el recobro de petróleo.

**1.3.1 Tipos de degradación.** La degradación del polímero durante las inyecciones de polímero puede ser: química, mecánica, y térmica.

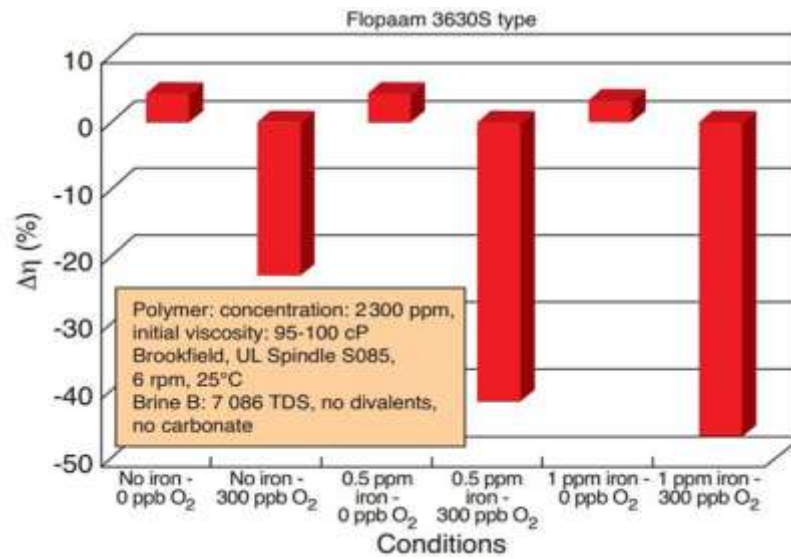
- **Degradación Química**

La degradación química está relacionada con la formación de radicales libres que pueden reaccionar con la estructura del polímero dando como resultado una caída de peso molecular<sup>10</sup> y la pérdida de viscosidad. La presencia de sustancias químicas o contaminantes tales como el oxígeno, contribuye a la formación de tales radicales. Por ejemplo, Fe y/o H<sub>2</sub>S en contacto con oxígeno causan degradación polimérica. Comúnmente se añaden compuestos estabilizantes a algunos polímeros para retrasar la aparición inevitable de degradación química. La Figura 6 muestra el porcentaje de pérdida de viscosidad de la solución polimérica en función de la concentración de hierro y oxígeno. La pérdida de viscosidad puede llegar al 50% con la adición de sólo 1 ppm de hierro y 300 ppb de oxígeno.

---

<sup>10</sup> Grollman, U., Schnabel, W., 1982. Free radical-induced oxidative degradation of polyacrylamide in aqueous solution. Polym. Degrad. Stab., 4, 203–212.

**Figura 6. Degradación del polímero en presencia de Hierro y Oxígeno.**



Fuente: Thomas, A., Gaillard, N., Favéro, C., 2013. Some key features to consider when studying acrylamide-based polymers for chemical enhanced oil recovery. Oil Gas Sci. Technol.

- **Degradación Mecánica**

La forma de degradación mecánica que es de mayor preocupación para los polímeros de inyección de agua, es la degradación asociada a los esfuerzos de corte. Esta degradación se produce cuando el polímero que se disuelve en solución se somete a altas velocidades de cizallamiento. Todos los polímeros disueltos degradan mecánicamente si se somete a una velocidad de cizallamiento de flujo suficientemente alta. Durante la inyección de polímero pueden existir perjudicialmente altas tasas de cizallamiento de flujo en los equipos de superficie de inyección (válvulas, bombas, y tuberías), en fondo de pozo (válvulas reguladoras de flujo, perforaciones), y en la roca yacimiento<sup>11</sup>.

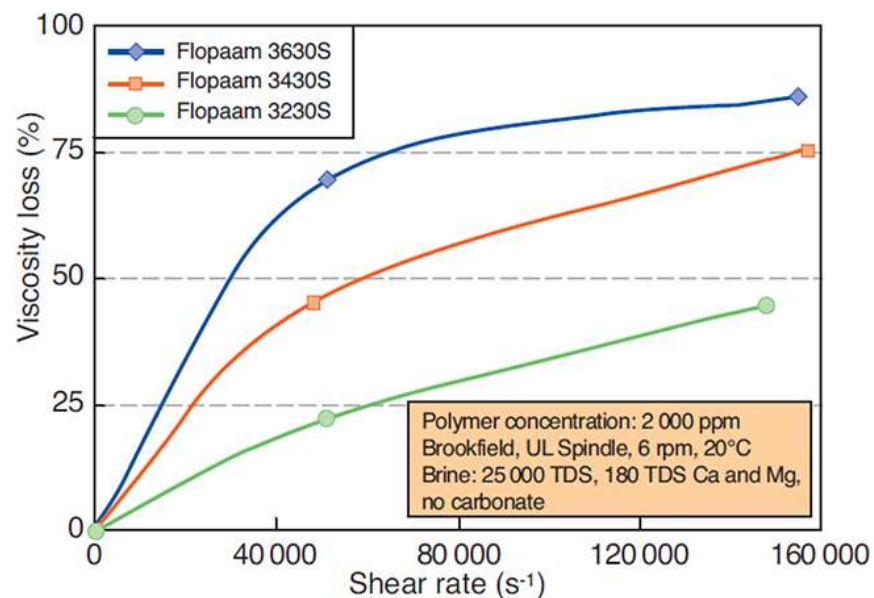
Generalmente el biopolímero de xantano no es mecánicamente degradado por cizalla a las condiciones de inyección. Sin embargo, bajo la mayoría de condiciones de inyección de polímero de inyección de flujo radial, polímeros de acrilamida de alto peso molecular son muy susceptibles a la degradación mecánica. Esto es especialmente cierto si la salmuera de inyección es alta en

<sup>11</sup> Maerker, J.M., 1975. Shear degradation of partially hydrolyzed polyacrylamide solutions. SPE J., 15(4)

dureza y salinidad. Cuando un polímero soluble en agua se encuentra en un medio con alta velocidad, se produce degradación por cizallamiento y por tensión de alargamiento que destruye la viscosidad de la solución polimérica.

En todos los casos, elegir el polímero adecuado es primordial: cuanto mayor sea el peso molecular promedio, mayor será la sensibilidad a la degradación por cizallamiento. La ruptura de un polímero de alto peso molecular puede mejorar la inyectividad con una menor pérdida de viscosidad. Un inconveniente de este método puede ser la pérdida del efecto viscoelástico que se da principalmente por la fracción de peso molecular más alto del polímero<sup>12</sup>. La Figura 7 muestra el impacto de la degradación por cizallamiento sobre polímeros con diferentes pesos moleculares. Este experimento se llevó a cabo utilizando un tubo de 0.875 mm de diámetro interno y una longitud de tubería de 200 mm. Como se mencionó anteriormente, cuanto mayor sea el peso molecular, mayor será la pérdida de viscosidad irreversible.

**Figura 7. Degradación del polímero en presencia de Hierro y Oxígeno.**



Fuente: Thomas, A., Gaillard, N., Favéro, C., 2013. Some key features to consider when studying acrylamide-based polymers for chemical enhanced oil recovery. Oil Gas Sci. Technol.

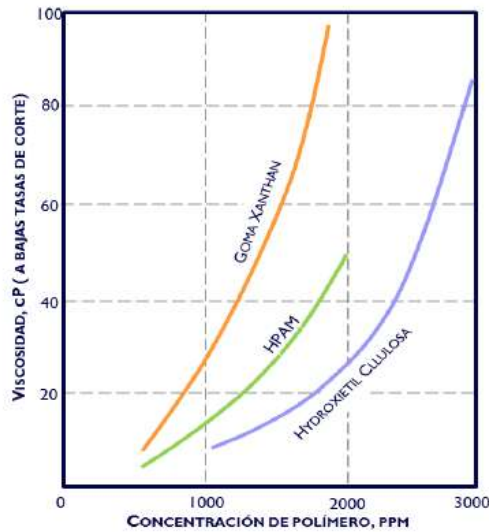
<sup>12</sup> Wang, D.M., Jiecheng, C., Qingyan, Y., Wenchao, G., Qun, L., 2000. Viscous-Elastic Polymer Can Increase Microscale Displacement Efficiency in Cores. Paper SPE 63227

- **Degradación térmica**

Stright (1976, 85) dice que todos los polímeros que se utilizan para inyección de agua tienen un límite de temperatura superior por encima del cual ya no son químicamente estables, con y sin la adición de un paquete estabilizador térmico apropiado. En su mayor parte, la temperatura de estabilidad térmica superior es una temperatura fija para un polímero de inyección de agua que se obtiene de un fabricante dado. Al iniciar una inyección de polímero se debe determinar que el polímero sea térmicamente estable bajo las condiciones de operación del polímero y la temperatura del yacimiento.

**1.3.2 Efecto sobre la viscosidad.** La viscosidad es una de las propiedades más importantes de las soluciones poliméricas, dado que esta propiedad permite disminuir la razón de movilidad entre el fluido de desplazamiento y el aceite. Depende de la estructura química del polímero y de su peso molecular (tamaño y extensión de la molécula), de las interacciones con el disolvente y de la concentración de la sustancia. En la Figura 8 se muestra la relación de la concentración de polímero con la viscosidad del mismo. Generalmente, una molécula de alto peso molecular en un buen disolvente adquiere un gran volumen hidrodinámico, y la viscosidad de la solución aumenta.

**Figura 8. Viscosidad vs. Concentración para diferentes polímeros.**



Fuente: SORBIE, K., “Polymer – Improved Oil Recovery”. Heriot – Watt University, 1991.

Las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas poseen grupos carboxilo que se disocian en solución acuosa, y las cargas negativas de los grupos  $\text{COO}^-$  disociados interactúan en solución de agua pura y destilada, de tal forma que la repulsión de las cargas que tienen la misma polaridad mantiene a la molécula de una forma más o menos tensa. Esto produce una molécula enrollada con el mayor volumen en solución, junto con el solvente que se encuentra confinado dentro de la molécula, lo que se traduce en una solución de alta viscosidad. Esto conlleva a que se necesiten menores cantidades de poliacrilamida parcialmente hidrolizada para obtener soluciones de alta viscosidad.

Al agregar sal a la solución polimérica, se altera la forma alargada de las moléculas a una forma esférica, como se observa en la Figura 9. Por tanto se pierde más del 90% de la viscosidad de la poliacrilamida.

**Figura 9. Efecto de una solución altamente ionizada sobre la poliacrilamida hidrolizada**



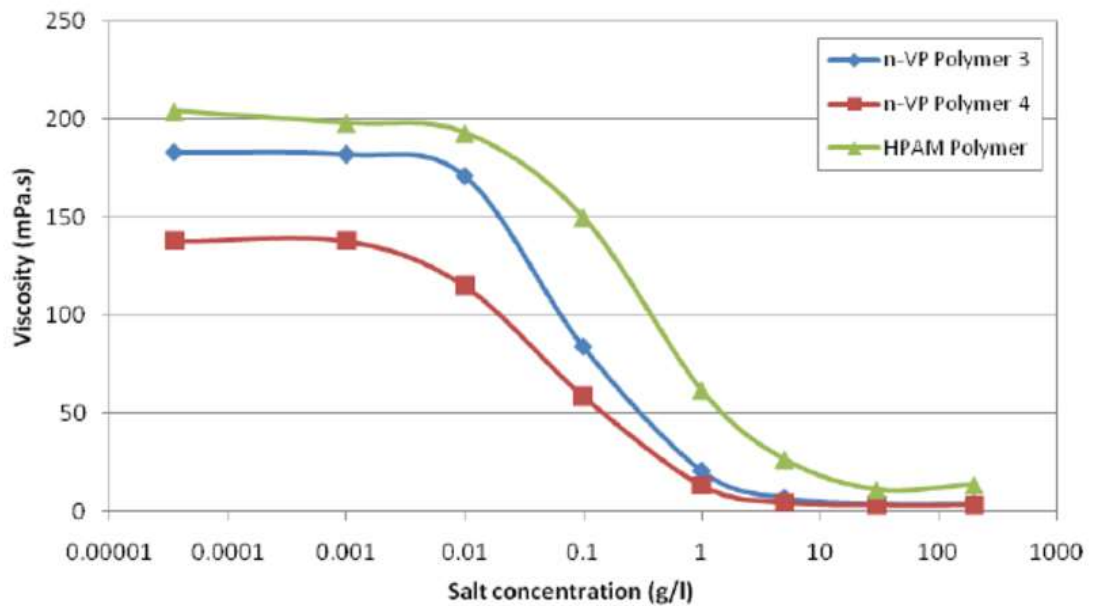
Fuente: BARREN, R.M. Diffusion in and through Solids, Macmillan, New York (1941)

En la Figura 10 se puede observar como la viscosidad del polímero se ve afectada por el incremento de la concentración de sal en la solución polimérica. La poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) presenta mayor poder viscosificante pero al mismo tiempo es más sensible a pérdida de viscosidad con aumento de la salinidad<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> VERMOLEN, C, et Al. (2011). Pushing the envelope for polymer flooding towards high-temperature and high-salinity reservoirs with polyacrylamide based ter-polymers. SPE

**Figura 10. Viscosidad del polímero en función de la salinidad de la solución polimérica.**



Fuente: VERMOLEN, et Al. (2011). Pushing the envelope for polymer flooding towards high-temperature and high-salinity reservoirs with polyacrylamide based ter-polymers. SPE

#### 1.4 MODELOS REOLÓGICOS

Los fluidos newtonianos son puramente fluidos viscosos para los cuales la tensión de cizallamiento varía directamente con la tasa de cizallamiento, de conformidad con la ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (3)$$

Donde:

$\tau$ : Esfuerzo de corte

$\mu$ : Viscosidad Newtoniana

$\dot{\gamma}$ : Tasa de corte

Un ejemplo de fluidos newtonianos son el agua y la mayoría de los crudos. Cualquier fluido que no obedezca a la ley de la viscosidad de Newton puede considerarse como no-newtoniano. Los fluidos como la poliacrilamida se comporta como fluidos no newtonianos, lo que significa que la viscosidad depende del corte aplicado (Figura 11). Estos muestran un comportamiento pseudo-plástico (shear thinning) donde la viscosidad disminuye a medida que aumenta la tasa de corte, siguiendo el modelo de ley de potencia. La viscosidad depende de la concentración y del peso molecular del polímero en la solución acuosa. Para tales fluidos, la viscosidad aparente a una velocidad de cizallamiento dada es:

$$\eta = \frac{\Upsilon}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

Donde:

$\eta$ : Viscosidad aparente

$\Upsilon$ : Esfuerzo de corte

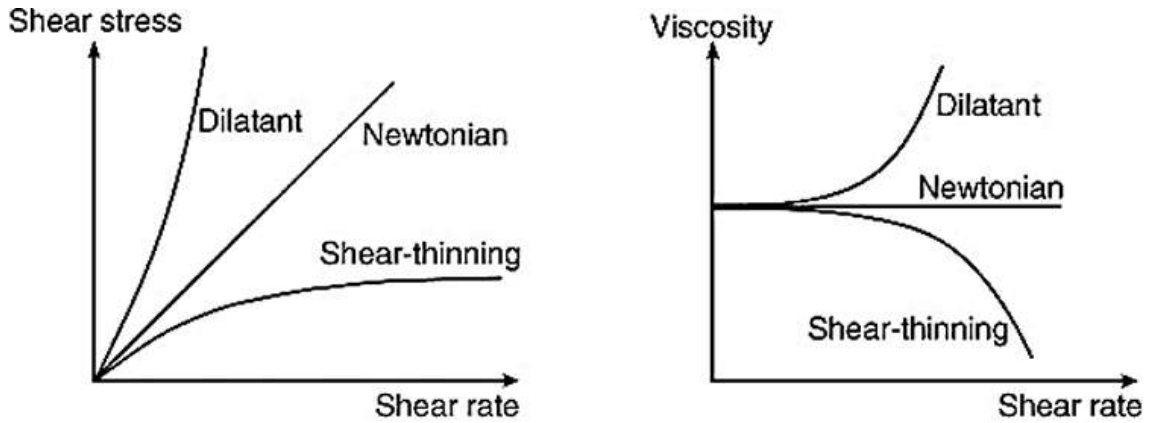
$\dot{\gamma}$ : Tasa de corte

El término “aparente” es usado para la viscosidad debido a que solo se puede dar a una específica tasa de corte<sup>14</sup>. Algunos modelos simples, netamente viscosos no-newtonianos son descritos a continuación.

---

<sup>14</sup> Norma API RP 63. Sección 3 - Reología de soluciones poliméricas.

**Figura 11. Tipos de fluidos y sus características.**



Fuente: SNF Internal Support for Training. Confidential document, issue 05, 2014.

**1.4.1 Modelo de Ley de Potencia.** La Ley de energía o modelo de Ostwald-deWaele se utiliza para describir muchas soluciones pseudoplásticas (shear thinning) o dilatante (shear thickening):

$$\gamma = K\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Donde:

$\gamma$ : Esfuerzo de corte, mPa

$K$ : Índice de consistencia. mPa.s<sup>n</sup>

$\dot{\gamma}$ : Tasa de corte, s<sup>-1</sup>

$n$ : Ley de potencia o Índice de comportamiento de flujo, adimensional

En este caso puede considerarse la viscosidad como el esfuerzo de corte dividida por la tasa de corte, entonces la viscosidad aparente del fluido de la ley de potencia está dada por:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

Donde:

$\eta$ : Viscosidad aparente, mPa.s ó cP

Para determinar los parámetros de la Ley de potencia K y n, el logaritmo de la ecuación 6 se toma como:

$$\log \eta = \log K + (n - 1) \log \dot{\gamma} \quad (7)$$

Por tanto en un gráfico log-log de la viscosidad aparente contra la tasa de corte, (n-1) será la pendiente de la línea recta y K será el intercepto a una tasa de corte de un (1)  $\text{seg}^{-1}$ .

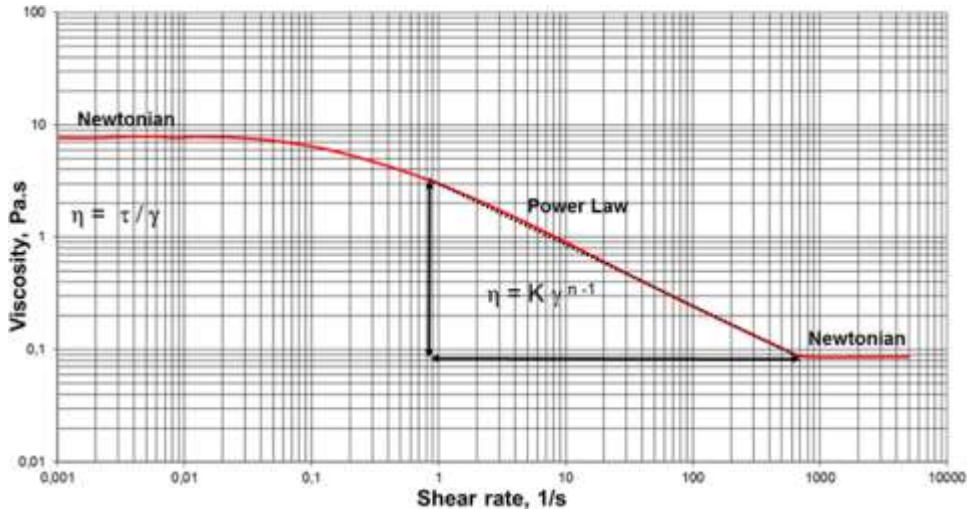
Entonces, para fluidos pseudoplásticos, n es <1; para fluidos dilatantes, n>1 y para fluidos newtonianos n=1. Debido a que muchas soluciones poliméricas experimentan un comportamiento pseudoplástico, se considera entonces que la ley de potencia tiene un amplio uso de aplicación pues dicho modelo refleja con precisión el comportamiento de soluciones poliméricas en un rango de tasas de corte entre 1 a 1000  $\text{s}^{-1}$ <sup>15</sup>.

La mayoría de las soluciones de polímero muestran un comportamiento newtoniano a muy bajas tasas de corte o a muy altas tasas de corte, sin embargo, el modelo de ley de potencia no predice este comportamiento. De hecho, el modelo predice viscosidades que tienden a infinito cuando la tasa de corte tiende a cero (Figura 12). Por lo tanto, es importante no extrapolar el modelo de ley de potencia más allá de su rango de aplicabilidad.

---

<sup>15</sup> Ibid., p.22.

**Figura 12. Comportamiento de la viscosidad para un fluido No-Newtoniano en función de la tasa de corte usando la Ley de Potencia.**



Fuente: Bonnier, J., Rivas, C., Gathier, F., Quillien, B., Thomas, A., 2013. In-line Viscosity Monitoring of Polymer Solutions Injected in Chemical Enhanced Oil Recovery Processes. Paper SPE 165249

**1.4.2 Modelo de Múltiples parámetros (EOR – Polímeros).** El comportamiento reológico que presentan las soluciones poliméricas durante los procesos de recobro mejorado, suelen ser un poco complejos. A bajas tasas de corte, las soluciones poliméricas tienden a comportarse como fluidos newtonianos; es decir que, la viscosidad de la solución es independiente del esfuerzo aplicado. Esta limitante de viscosidad newtoniana se denomina como la viscosidad de cero corte,  $\eta_0$ . Cuando existen altas tasas de corte, la solución presenta un comportamiento pseudoplástico, el cual va en aumento directamente relacionado con la tasa de corte provocando una disminución en la viscosidad. Por otro lado, a tasas de corte mucho más altas, la mayoría de soluciones poliméricas experimentan un segundo comportamiento, muy semejante al newtoniano, donde su viscosidad tiende al infinito,  $\eta_\infty$ .

Mediante el uso de modelos que admitan tres parámetros o más, es posible representar con mayor precisión el comportamiento de la viscosidad de las soluciones poliméricas teniendo en cuenta varios órdenes de magnitud en la

tasa de corte. A continuación, se exponen brevemente dos de los modelos más aplicables conocidos como la ecuación de Ellis y la ecuación de Carreau.

- **Modelo de Ellis<sup>16</sup>**

**La ecuación de Ellis para 3 parámetros, se representa por:**

$$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{0,5}} \right)^{\alpha-1} \quad (8)$$

Donde:

$\dot{\gamma}_{0,5}$ : Esfuerzo de corte a la que se mide la viscosidad

$\eta$ : Fracción del valor de la viscosidad cuando  $\eta_0$

$\alpha - 1$ : Pendiente del gráfico  $\frac{\eta_0}{\eta} - 1$  Vs  $\log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_{0,5}}$

$\alpha$ : Recíproco del parámetro  $n$  de la Ley de Potencia

Este modelo es muy flexible ya que incluye la Ley de Newton y la Ley de potencia como casos especiales. La principal ventaja que tiene el modelo de Ellis sobre la Ley de potencia es que se puede calcular una viscosidad finita limitante a muy bajas tasas de corte (para  $\alpha > 1$ ) (Figura 13), sin embargo, no es posible determinar valores de viscosidad a altas tasas de corte.

- **Modelo de Carreau<sup>17</sup>**

Con la ecuación de Carreau, es posible modelar cuatro parámetros, es un modelo que se considera muy útil para descripción del comportamiento de la viscosidad de soluciones poliméricas diluidas de alto peso molecular. Dicho modelo, está descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{\eta - \eta_\alpha}{\eta_0 - \eta_\alpha} = [1 + (\lambda * \dot{\gamma})^2]^{n-1/2} \quad (9)$$

Donde:

---

<sup>16</sup> Ibid., p.23

<sup>17</sup> Ibid., p.23

$\eta$ : Viscosidad a la tasa de corte  $\dot{\gamma}$

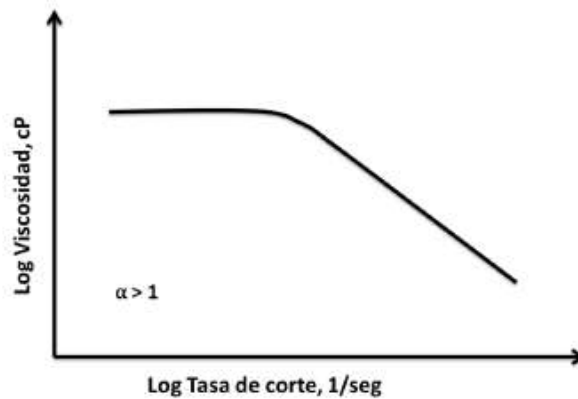
$\eta_0$ : Viscosidad Newtoniana cuando la tasa de corte tiende a cero

$\eta_\infty$ : Viscosidad Newtoniana cuando la tasa de corte tiende a infinito

$n - 1$ : Pendiente a partir de los datos de la Ley de Potencia

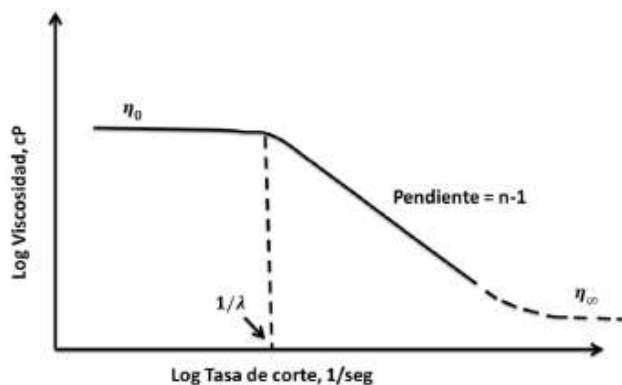
$\lambda$ : Constante de tiempo que indica la desviación de cero tasa de corte hasta la región de la Ley de Potencia (Figura 14)

**Figura 13. Comportamiento de la viscosidad para un fluido No-Newtoniano según el Modelo de Ellis.**



Fuente: Norma API RP 63. Sección 3 - Reología de soluciones poliméricas.

**Figura 14. Comportamiento de la viscosidad para un fluido No-Newtoniano según el Modelo de Carreau.**



Fuente: Norma API RP 63. Sección 3 - Reología de soluciones poliméricas.

## 2 VALVULAS REGULADORAS DE FLUJO

En este capítulo se presenta un resumen de las generalidades de la inyección de agua con sarta selectiva y un detalle de las diferentes partes que componen las válvulas reguladoras de flujo.

### 2.1 INYECCION SELECTIVA

Durante los procesos de inyección de agua uno de los principales objetivos es mantener una óptima eficiencia de barrido vertical de tal manera que todos los intervalos del yacimiento sometidos a la inyección puedan recibir una cantidad de agua acorde a sus propiedades. En la práctica al tener varias capas con diferentes propiedades petrofísicas como la permeabilidad (Figura 15) si no se realiza una inyección selectiva a cada estrato o capa, se producirá una canalización en las arenas de mejores propiedades quedando una cantidad de petróleo sin desplazar. Con el fin de mejorar la eficiencia vertical en un proceso de inyección de agua se puede:

- Aislar (selectividad) las diferentes capas o estratos por medio de herramientas diseñadas a tal fin.
- Mediante el uso de válvulas reguladoras se controla el volumen de agua inyectada a cada estrato o capa del yacimiento para que el “barrido” sea lo más eficiente posible.

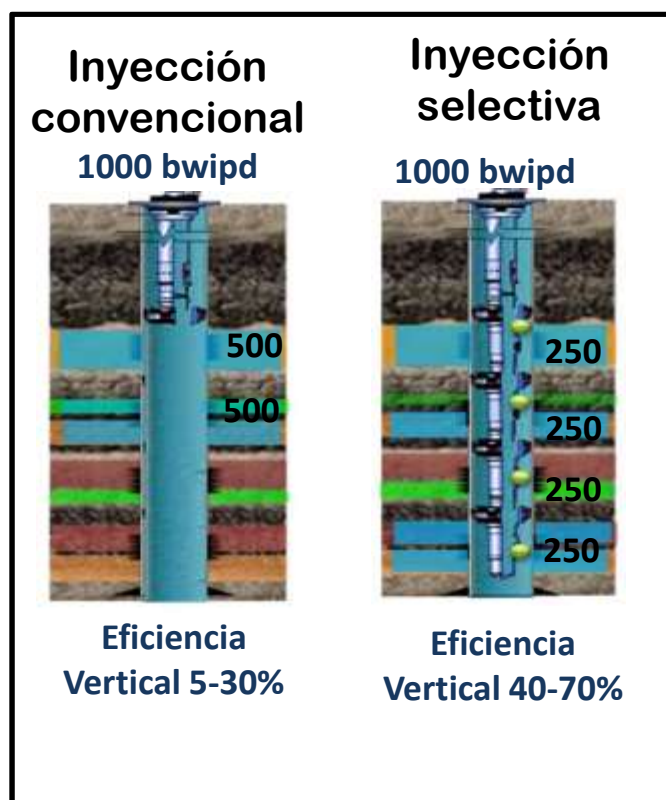
La función principal de la inyección de agua con sarta selectiva es controlar los volúmenes exactos de agua que se quieren inyectar a cada estrato o capa del yacimiento con una menor caída de presión (Figura 16). Esto permite que el agua que es inyectada, penetre por la misma sarta de inyección a diferentes zonas.

Figura 15. Diagrama esquemático de Eficiencia vertical por la inyección de agua en un yacimiento heterogéneo.



Fuente: FRAGOZO, M. "Factibilidad de implementar un proceso de inyección de polímeros en un campo Colombiano". Proyecto de Grado. 2014.

Figura 16. Diagrama sarta de inyección convencional y sarta de inyección selectiva en un yacimiento heterogéneo.



Fuente: Presentación recobro mejorado ECOPETROL S.A

Generalmente, el costo de un completamiento de inyección selectiva es aproximadamente seis veces mayor que un completamiento convencional, excluyendo el costo adicional por tiempo de taladro y problemas de producción.

El modelo de completamiento de inyección selectiva consiste de una sarta con empaques ubicados en profundidad y mandriles de bolsillo entre dichos empaques, donde las válvulas reguladoras de flujo (VRF) son ubicadas para controlar selectivamente el perfil de inyección en cada arena de manera individual, con el fin de obtener un barrido vertical más eficiente. En la Figura 17 se observa la configuración de una sarta de inyección selectiva, como la utilizada en el Campo Yariguí.

## **2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

Las válvulas reguladoras de flujo fueron diseñadas para ser utilizadas en los procesos de inyección de agua con sarta selectiva. Estas válvulas permiten regular el caudal de agua que des ingresado en cada zona.

El regulador de caudal se basa en la patente de Waterman de los años 50. El principio consiste en el uso de dos orificios en el regulador, uno de dimensiones fijas y otro cuyas dimensiones varían en proporción a la presión, este último orificio lo conforman un tubo de flujo y un resorte. El orificio variable es el encargado de mantener un caudal constante predeterminado, independiente a los cambios de presión que se presenten en el sistema o en el yacimiento

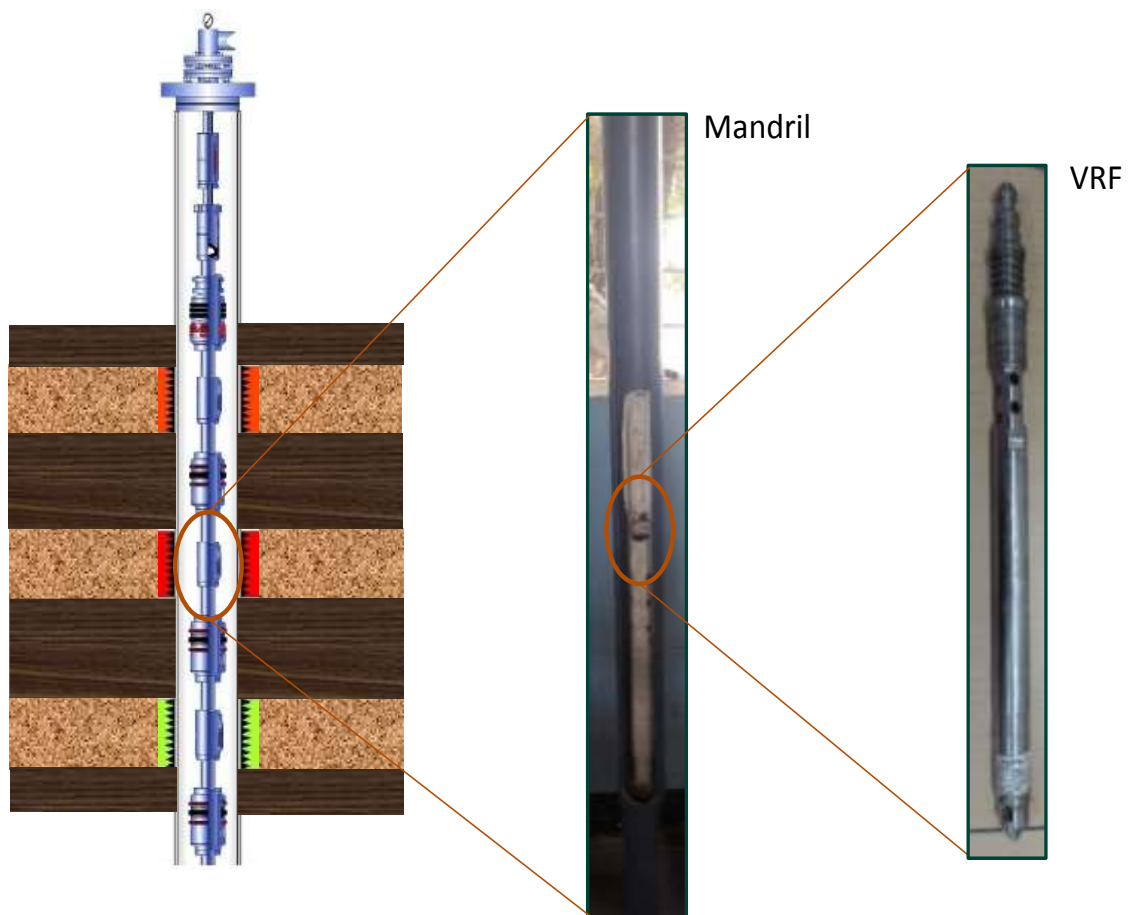
El regulador es calibrado para un flujo determinado, cambiando solamente el orificio fijo. Los cambios en la presión de inyección o en el yacimiento pueden hacer que la caída de presión a través del orificio aumente. Cuando esto ocurre, la fuerza del resorte es superada y provoca una restricción por parte del vástago, en el orificio variable<sup>18</sup>. La constante de recuperación del resorte le

---

<sup>18</sup> MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPEPETROL S.A.

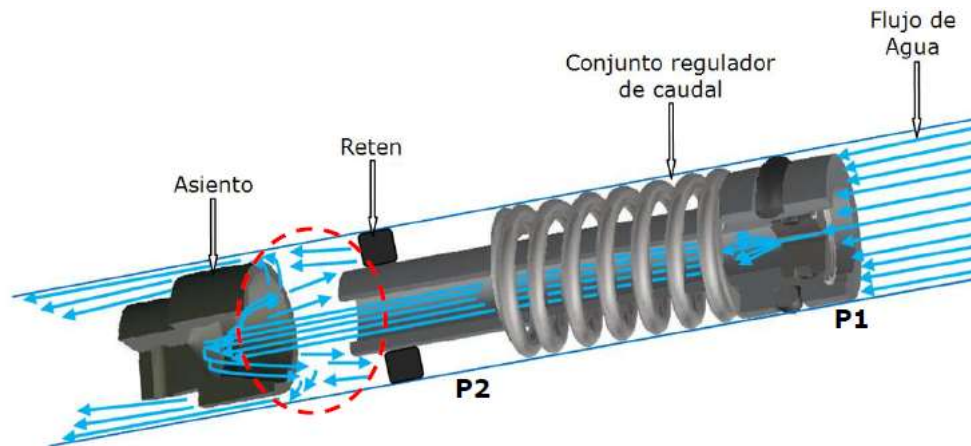
permite retornar a su forma original luego de contraerse, debido a esto se logra ampliar o reducir el orificio variable, manteniendo un caudal constante independientemente de cualquier cambio o variación en las presiones.

**Figura 17. Configuración sarta de inyección selectiva**



Fuente: Presentación recobro mejorado ECOPETROL S.A

**Figura 18. Flujo a través de la válvula reguladora de flujo**



Fuente: MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPEPETROL S.A.

El regulador debe tener un diferencial mínimo de presión a través del mismo para proporcionar el funcionamiento de la válvula. El diferencial mínimo de presión (DMP) depende del tipo de regulador y diámetro del orificio fijo, además del fluido que pasa a través del mismo<sup>19</sup>.

El caudal (Q), es la magnitud asociada al volumen de líquido que pasa en un intervalo de tiempo por la sección de un tubo

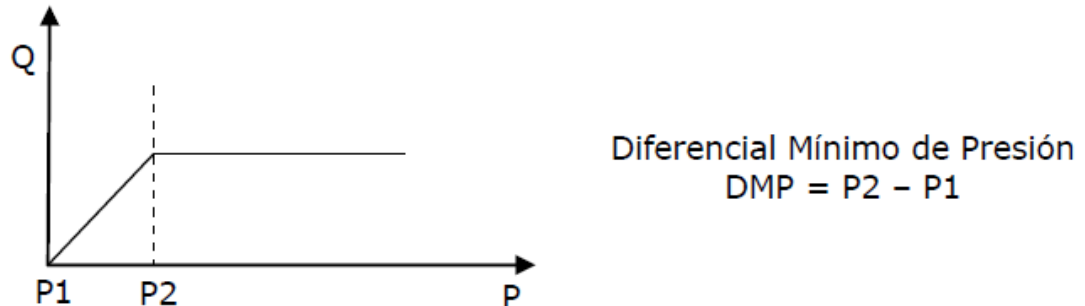
$$Q = \frac{V}{t} \quad (10)$$

Donde (V), es el volumen de fluido y (t) es el tiempo en el cual se evalúa el paso e este volumen.

---

<sup>19</sup> Ibid., p.9

**Figura 19. Diferencial mínimo de presión en el regulador de la válvula reguladora de flujo**



Fuente: MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPEPETROL S.A.

### **2.3 CONJUNTOS QUE INTEGRAN LA VALVULA REGULADORA DE FLUJO**

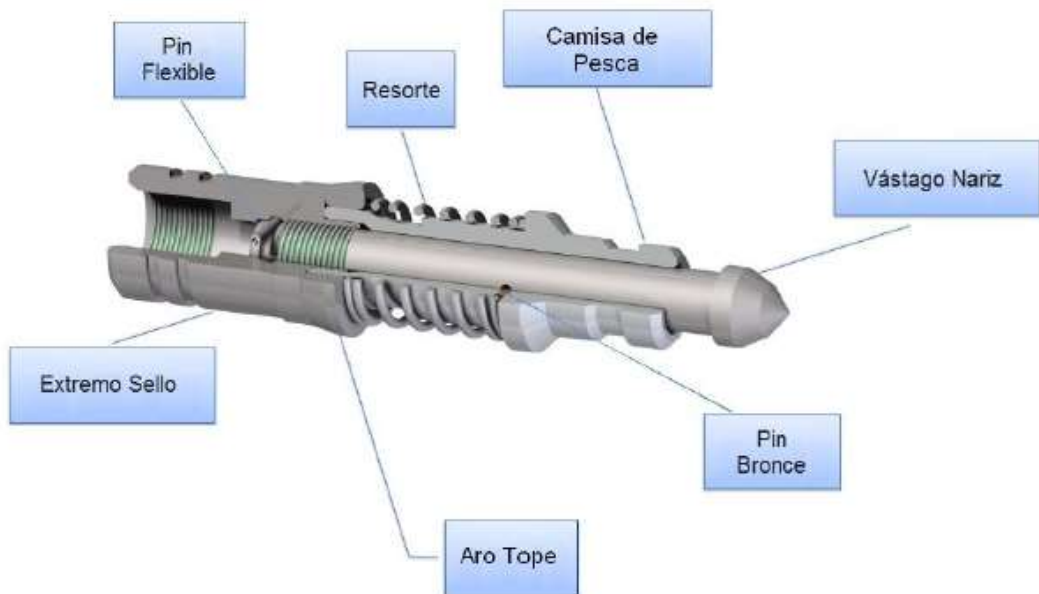
En la actualidad hay una gran variedad de empresas encargadas de fabricar válvulas reguladoras de flujo, dentro de estas se encuentran Parko Services, Schlumberger Limited, Binning Oil Tools, entre otras. En la actualidad en el Campo Yarigui el mayor porcentaje de válvulas reguladoras utilizadas son fabricadas por Binning Oil Tools. Las partes y el funcionamiento de la válvula no varía según el fabricante, las variaciones se presentan en tamaño, materiales utilizados y calidad.

**2.3.1 Latch o cuerpo de pesca.** Su función principal es permitir la manipulación de la válvula, ya que se utiliza para bajarla y/o recuperarla, esta parte de la válvula le permite engancharse en la Running Tool, la cual, cuando asienta la válvula golpea con el cuerpo de pesca hasta fijarla en la camisa del mandril; al momento de recuperarla se proporcionan golpes leves entre el vástago nariz y el cuerpo de pesca con el fin de romper el pin de bronce y poder liberar el aro tope<sup>20</sup> (Figura 20).

---

<sup>20</sup> Ibid., p.7

**Figura 20. Componentes cuerpo de pesca de la válvula reguladora de flujo**



Fuente: MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPETROL S.A.

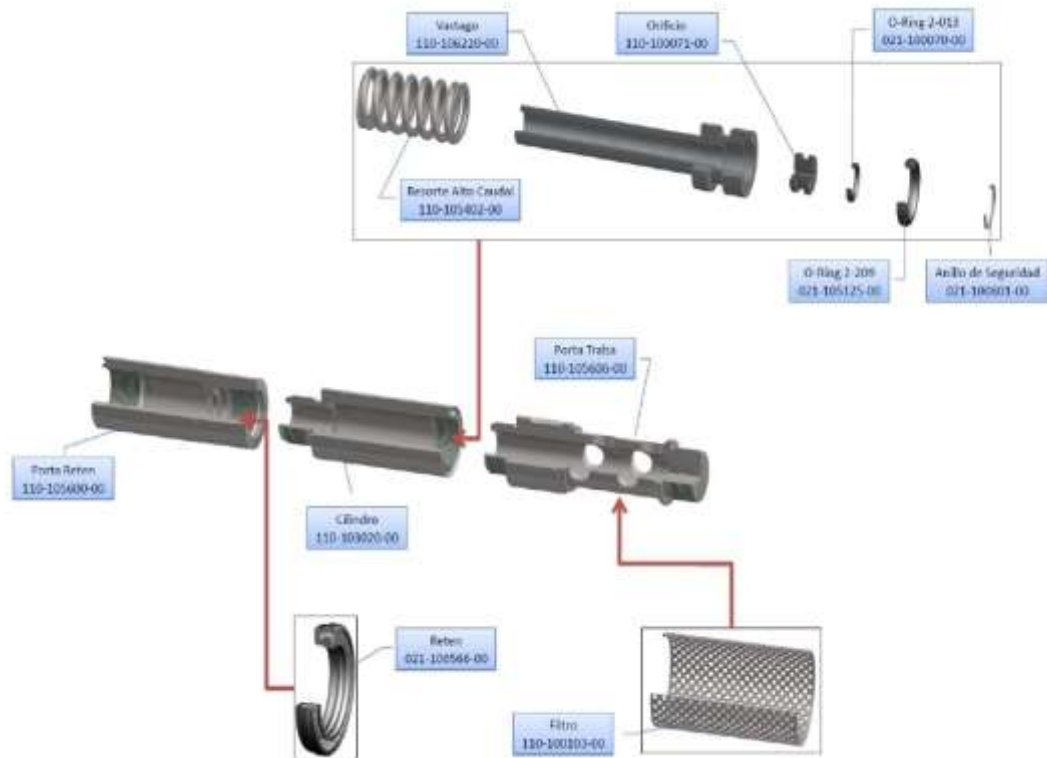
**2.3.2 Cuerpo Dinámico.** En esta parte se lleva a cabo la regulación del caudal por lo cual se convierte en la parte más importante de la válvula. El caudal de agua que fluye por el orificio fijo genera una caída de presión y el empuje para desplazar el vástago y el orificio aguas abajo. El resorte trata de resistir este movimiento, al ser vencido reduce el área de salida del asiento y así mismo el caudal de salida<sup>21</sup>.

Por lo tanto, el caudal de agua que pasa por el regulador permanece constante según el tamaño del orificio fijo y la tensión del resorte, independientemente de las variaciones de presión. En la Figura 21 se pueden observar todas las partes que conforman el cuerpo dinámico de las válvulas reguladoras de flujo.

---

<sup>21</sup> Ibid., p.8

**Figura 21. Componentes cuerpo dinámico de la válvula reguladora de flujo**



Fuente: MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPETROL S.A.

Existen dos tipos de resorte: rojo y amarillo, donde el amarillo presenta una dureza superior por lo que genera una mayor resistencia al movimiento del vástago, provocando así que este se mantenga mucho más alejado del asiento, y en consecuencia al existir mayor distancia entre ellos, se genera un caudal (Q) mayor. La combinación de diferentes resortes y orificios permite el ajuste del caudal necesario en cada válvula. La Tabla 1 presenta las diferentes combinaciones y los caudales que se pueden obtener de cada una de ellas.

**Tabla 1. Configuración de cuerpo dinamico para regular un caudal especifico.**

ORIFICIO	Q (BWPD)	FACTOR SEGURIDAD 10%		Q (BWPD)	FACTOR SEGURIDAD 10%	
	ROJO ( R )	Q MIN	Q MAX	AMARILLO	Q MIN	Q MAX
2,00	57	51,3	62,7	138	124,2	151,8
2,25	88	79,2	96,8	176	158,4	193,6
2,50	113	101,7	124,3	214	192,6	235,4
2,75	132	118,8	145,2	233	209,7	256,3
3,00	151	135,9	166,1	258	232,2	283,8
3,25	170	153	187	283	254,7	311,3
3,50	189	170,1	207,9	308	277,2	338,8
3,75	214	192,6	235,4	352	316,8	387,2
4,00	245	220,5	269,5	421	378,9	463,1
4,25	289	260,1	317,9	465	418,5	511,5
4,50	315	283,5	346,5	547	492,3	601,7
4,75	340	306	374	642	577,8	706,2
5,00	409	368,1	449,9	755	679,5	830,5
5,25	459	413,1	504,9	937	843,3	1030,7
5,50	484	435,6	532,4	1006	905,4	1106,6
5,75	509	458,1	559,9	1082	973,8	1190,2
6,00	616	554,4	677,6	1170	1053	1287
6,25	679	611,1	746,9	1220	1098	1342
6,50	704	633,6	774,4	1296	1166,4	1425,6
6,75	730	657	803	1371	1233,9	1508,1
7,00	755	679,5	830,5	1415	1273,5	1556,5
7,25	767	690,3	843,7	1459	1313,1	1604,9
7,50	786	707,4	864,6	1503	1352,7	1653,3
7,75	837	753,3	920,7	1535	1381,5	1688,5
8,00	893	803,7	982,3	1566	1409,4	1722,6
8,25	931	837,9	1024,1	1780	1602	1958
8,50	937	843,3	1030,7	1805	1624,5	1985,5
8,75	950	855	1045	1837	1653,3	2020,7
9,00	1063	956,7	1169,3	1918	1726,2	2109,8

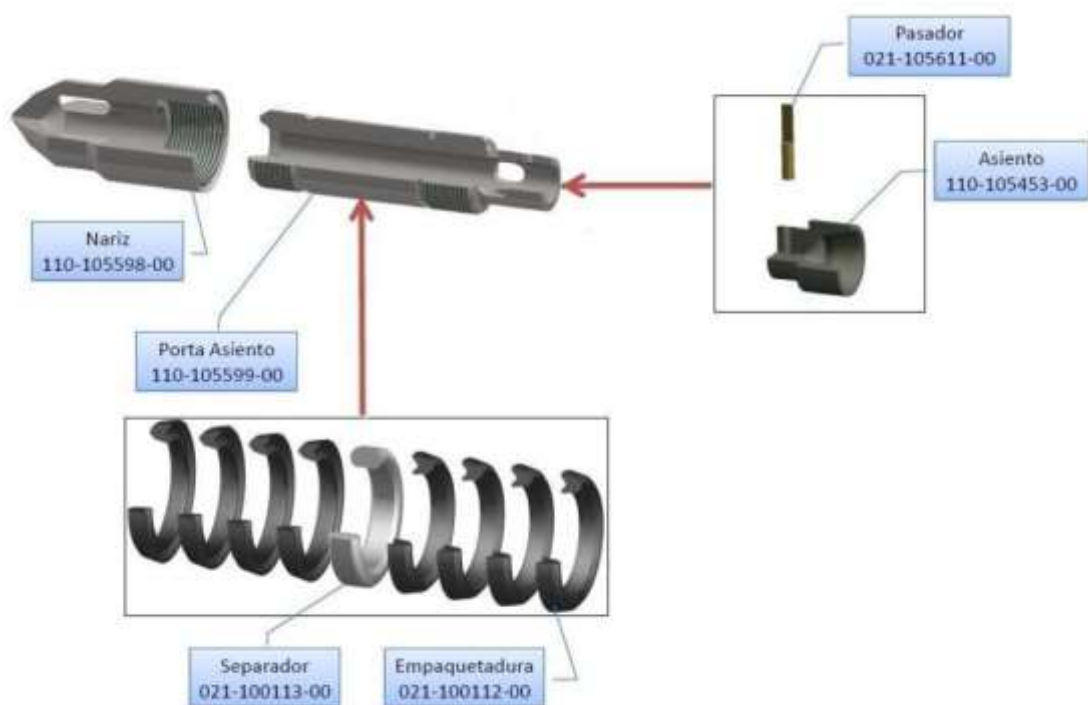
Fuente: MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPETROL S.A.

**2.3.3 Cuerpo de anclaje.** El cuerpo de anclaje es el encargado de asegurar la válvula reguladora de flujo al mandril y para esto se utilizan los V-Packing. Así mismo, la nariz además de permitir la salida del agua de forma uniforme, sirve de guía al momento de ubicarla en el bolsillo del mandril y así brindar mayor eficiencia en la operación de anclaje.

En este tipo de configuración, ya que hay varios tipos, el asiento es el encargado de proporcionar un flujo laminar a la salida de la válvula, antes de

llegar a esta pieza el flujo a través del vástago es de tipo turbulento. Con el tiempo se determinó que el anclaje realizado por la configuración de V-Packing (Figura 22) era muy grande y aumentaba las posibilidades de doblar o romper el Latch de la válvula y así mismo generar un pescado en el pozo<sup>22</sup>. En la actualidad, generalmente se usan dos V-Packing en la parte más cercana de la nariz, seguidos del separador y los otros seis V-Packing.

**Figura 22. Cuerpo de anclaje de la válvula reguladora de flujo**



Fuente: MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPEPETROL S.A.

## 2.4 TIPOS DE VALVULAS

Actualmente se tienen varios tipos de válvulas las cuales varían según la empresa fabricante o la configuración que tengan. Cuando se habla de configuración se hace referencia a la forma de ensamblaje y componentes internos utilizados para la regulación del caudal.

<sup>22</sup> Ibid., p.10

Las válvulas se clasifican en tres grupos dependiendo de su función: válvulas reguladoras de flujo, dummies, y válvulas de circulación.

**2.4.1 Válvulas Reguladoras de Flujo.** Son aquellas que poseen conjunto dinámico y se encargan de mantener un caudal constante predeterminado independiente del cambio de presión en el pozo o en el yacimiento.

- **VRF W15:** Este tipo de válvula fue diseñada, elaborada y comercializada por Binning Oil Tools, es la más utilizada en el campo Yariguí, cuenta con un conjunto dinámico completo, con un sistema de control de caudal mediante orificios fijos intercambiables y orificios variables según la configuración resorte-orificio. El diferencial mínimo requerido por estas válvulas es de 80 y el máximo 180 psi.
- **VOF:** También conocida como válvula de orificio fijo, es una configuración o modificación realizada a la válvula VRF W15, su conjunto dinámico no cuenta con el asiento, por lo que mantiene un flujo turbulento. Una vez agrupado el orificio y el vástago, se ubican en el cilindro e ingresan totalmente al porta reten junto con el retenedor, contrario a la VRF W15 el cilindro se ubica en la parte superior del vástago para contrarrestar retornos. En este caso el cilindro no cumple ninguna función de regulación, y por lo tanto se anula el orificio variable.

**2.4.2 Válvulas Dummies.** Estas válvulas no permiten el paso de fluido a la formación, estas válvulas son totalmente cerradas por lo que no poseen conjunto dinámico y no permiten el ingreso de fluido debido a que actúan como un tapón con el propósito de aislar zonas y evitar canalizaciones.

**2.4.3 Válvulas de Circulación (VFO).** También conocidas como Válvulas Full Open (VFO), no poseen conjunto dinámico. A diferencia de las válvulas tipo

Dummies, éstas permiten inyectar fluido a la formación sin ningún tipo de regulación.

Estas válvulas han sido utilizadas para el proyecto de inyección de polímeros en el campo Yariguí debido a que se asume que no se genera una degradación del polímero al pasar a través de esta, pero su problema es la no regulación del caudal hacia la formación ocasionando que las capas o estratos de alta permeabilidad sean los que más admitan fluidos quedando otras zonas del yacimiento sin recibir beneficio del polímero.

### 3 DISEÑO EXPERIMENTAL

En este capítulo se realizara toda la revisión de los protocolos vigentes definidos para las pruebas de laboratorio relacionadas con la medición de la degradación mecánica del polímero. Estas pruebas están descritas según los protocolos definidos en la norma API RP63 (***Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations 1990***). Además de lo anterior se presentara el nuevo protocolo propuesto para la medición de la degradación mecánica del polímero a través de válvulas reguladoras de flujo.

#### 3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES PRELIMINARES

Para realizar las pruebas de degradación mecánica del polímero, se deben efectuar otros ensayos iniciales, los cuales son descritos a continuación.

**3.1.1 Determinación del porcentaje de humedad en muestras solidas de HPAM.** Se debe realizar este procedimiento para cuantificar el porcentaje de humedad presente en la muestra solida de polímero y con esta información calcular de manera más acertada la cantidad de polímero requerido en la preparación de la solución madre.

##### **Procedimiento<sup>23</sup>**

- Pesar un vidrio reloj. Se debe asegurar que esté limpio y completamente seco.
- Pesar 1,5 gr de polímero sólido.
- Calentar la muestra en el horno por 1 hora, a una temperatura entre 100-105 °C.
- Llevar inmediatamente a un desecador, y dejar la muestra 1 hora en el mismo.

---

<sup>23</sup> Norma API RP 63. Sección 2.3 – Procedimiento de laboratorio para la preparación de soluciones poliméricas.

- Pesar nuevamente la muestra de polímero deshidratada y registrar el peso final.
- Calcular el porcentaje de humedad de acuerdo a la Ecuación 11.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso Final}}{\text{Peso inicial}} * 100 \quad (11)$$

**3.1.2 Preparación de salmuera.** Para crear la salmuera base con la que se preparará el polímero, debe definirse la salinidad del agua de formación del campo que se desea representar, ya sea en porcentaje peso a peso (%p/p), gramos o cualquier otra unidad de medición parecida.

#### **Procedimiento<sup>24</sup>**

- Tomar un balón aforado a la cantidad de salmuera que se desea preparar y verter agua destilada hasta 1/3 del balón.
- Pesar un vaso precipitado y tarar la balanza, allí mismo pesar la cantidad de sal requerida.
- Agregar agua destilada al vaso precipitado y posteriormente verterlo en el balón. Se debe repetir mínimo 5 veces para asegurar que toda la sal sea depositada en el balón aforado, y no queden rastros en el vaso de precipitado.
- Llenar el faltante del balón con agua destilada, hasta alcanzar el aforo. El menisco formado debe encontrarse por encima del aforo, dado que la salmuera es un fluido claro.

**3.1.2 Preparación de solución madre.** Para asegurar que la preparación la solución madre sea correcta, se debe conocer el porcentaje de humedad del polímero.

---

<sup>24</sup> Ibid., p.6

### Procedimiento<sup>25</sup>

- Calcular la cantidad necesaria para preparar la solución polimérica a la concentración deseada. Este cálculo se puede realizar utilizando la Ecuación 12.

$$X_{polimero} (g) = \frac{\text{Concentracion madre} \left(\frac{mg}{l}\right) * \text{Cantidad de Solucion} (l)}{1000 * (1 - \%Humedad)} \quad (12)$$

- Pesar el polímero hallado en el paso anterior en un vidrio reloj cubierto con aluminio, con el fin de asegurar que este no vaya a humedecerse durante el procedimiento.
- Calcular el peso requerido de agua o salmuera de preparación. Este valor se halla restando al peso total y el peso de polímero hallado, como lo indica la Ecuación 13.

$$Y(g) = \left( \text{Cantidad de Solución}(ml) * \text{Densidad de salmuera} \left(\frac{g}{ml}\right) \right) - X_{polimero}(g) \quad (13)$$

- Pesar el agua calculada en el paso anterior en un beaker.
- Iniciar la agitación a velocidad suficiente para que se genere un vórtice que ocupe aproximadamente el 70% del volumen del beaker.
- Agregar el polímero gradualmente sobre el hombro del vórtice de manera continua, formando un hilo, y de forma muy pausada.
- Dejar en agitación por 24 horas.

---

<sup>25</sup> Ibid., p.6

Se recomienda que de llegarse a observar grumos durante el período de agitación, se repita nuevamente todo el procedimiento, dado que esto indica que el polímero se ha floculado en la solución.

### 3.1.3 Preparación de soluciones diluidas

- Pesarse en un beaker la cantidad de solución madre necesaria para preparar la solución a la concentración requerida. La solución madre debe ser tomada del recipiente que la contiene con una jeringa sin punta, para así evitar someterla a esfuerzos de corte muy altos que puedan degradarla mecánicamente.

El cálculo de la cantidad de solución madre necesaria para preparar la solución diluida se puede realizar utilizando la Ecuación 14.

$$V_i = \frac{V_f * C_f}{C_i} \quad (14)$$

Donde:

$V_i$ : Volumen de solución madre.

$C_i$ : Concentración de la solución madre.

$V_f$ : Volumen a preparar de la solución diluida.

$C_f$ : Concentración de la solución diluida.

- Adicionar al beaker el agua o salmuera de preparación hasta completar el peso total de solución diluida.
- Agitar la mezcla por una (1) hora; verificar que se genere un vórtice. Los tiempos de agitación son independientes de la concentración de la solución diluida, pero sí dependen del peso molecular del polímero, dado que a un mayor peso molecular, las cadenas poliméricas son necesariamente más grandes, lo que requiere de mayores tiempos de agitación.

### 3.2 PROTOCOLO DE MEDICION DE LA DEGRADACION MECANICA DEL POLIMERO SEGÚN NORMA API RP 63

Este procedimiento se realiza con el objetivo de simular las condiciones de paso de las soluciones poliméricas por las facilidades, tuberías y las perforaciones del pozo. Es deseable que la pérdida de viscosidad luego de someter la solución polimérica al cizallamiento no sea superior al 40% para preservar la mayor viscosidad posible y evitar usar soluciones de mayor concentración que implicarían mayores costos<sup>26</sup>.

En esta prueba, la solución polimérica es presurizada a través de un tubo capilar a diferentes caudales de flujo obtenidos al variar la presión aplicada. La tasa de corte (shear rate, SR) que sufre la solución polimérica puede ser calculada con los caudales medidos que pasan a través del capilar de radio conocido según la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (15)$$

Donde:

$\dot{\gamma}$ : Tasa de corte “shear rate”, Seg<sup>-1</sup>

$Q$ : Tasa de flujo, cm<sup>3</sup>/seg

$R$ : Radio interno del capilar, cm

A continuación se describe el paso a paso para la prueba de degradación mecánica por efecto de corte de las soluciones poliméricas<sup>27</sup>.

- A la solución polimérica sometida a este procedimiento se le mide previamente viscosidad a 7.3 s<sup>-1</sup> a temperatura ambiente.

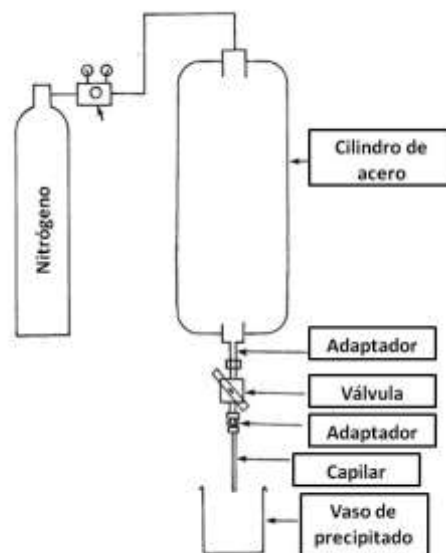
---

<sup>26</sup> PACHON CONTRERAS, Zarith. Evaluación experimental roca - fluido para recobro mejorado en el campo Yariguí– fase dinámica. ECOPETROL S.A

<sup>27</sup> Norma API RP 63. Sección 6.6 – Evaluación de la estabilidad de corte en soluciones poliméricas.

- Ensamblar el equipo de degradación mecánica. Este dispositivo es del tipo cilindro – pistón libre con el fin de uniformizar la presión aplicada en la solución. (Figura 23)
- Llenar el cilindro de acero con la solución polimérica preparada
- Conectar el cilindro de acero a la fuente de nitrógeno.
- Aplicar una presión de 10 psi con nitrógeno.
- Abrir la válvula y coleccionar aproximadamente 200 ml de solución polimérica en un contenedor de vidrio previamente pesado, simultáneamente determinar el tiempo que tarda en recolectarse la muestra, pesar la muestra y calcular el caudal.
- Repetir la prueba a presiones de 30, 50 y 100 psi o presiones mayores dependiendo del capilar usado.
- Medir la viscosidad de la solución polimérica final a  $7.3 \text{ s}^{-1}$  a temperatura ambiente.
- Realizar cálculo de tasa de corte según ecuación 15.

**Figura 23. Equipo de medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas**



**Fuente: Norma API RP 63. Sección 6.6 – Evaluación de la estabilidad de corte en soluciones poliméricas.**

### **3.3 DISEÑO DEL NUEVO PROTOCOLO DE MEDICION DE LA DEGRADACION MECANICA DEL POLIMERO EN VALVULAS REGULADORAS DE FLUJO**

Desde el año 2006 se ha incrementado el uso de sartas selectivas con válvulas reguladoras de flujo en los procesos de recobro secundario para mejorar la eficiencia vertical de inyección; sin embargo estas no han sido usadas en procesos de inyección de agua mejorada (solución polimérica) por la degradación que esta puede presentar por el aumento de la tasa de corte lo que ocasiona una disminución de la viscosidad de la solución polimérica.

El protocolo vigente para medir la degradación mecánica de la solución polimérica está basado en la norma API RP 63 como se explicó en el numeral 3.2, donde se utiliza un capilar para cuantificar dicha degradación.

En ese sentido, en este trabajo se busca evaluar el impacto de las válvulas reguladoras de flujo (VRF) en la disminución de la viscosidad de las soluciones poliméricas, por lo cual se realiza una modificación al montaje de la Norma API RP 63 el cual se explica a continuación.

**3.3.1 Descripción del montaje del banco de prueba experimental.** El principio fundamental del equipo utilizado según Norma API RP 63 para la medición de la degradación mecánica del polímero (Figura 23) consiste en hacer pasar una solución polimérica a través de un capilar a diferentes caudales de flujo obtenidos al variar la presión aplicada. La tasa de corte (shear rate, SR) que sufre la solución polimérica puede ser calculada con los caudales medidos que pasan a través del capilar de radio conocido según la ecuación 15.

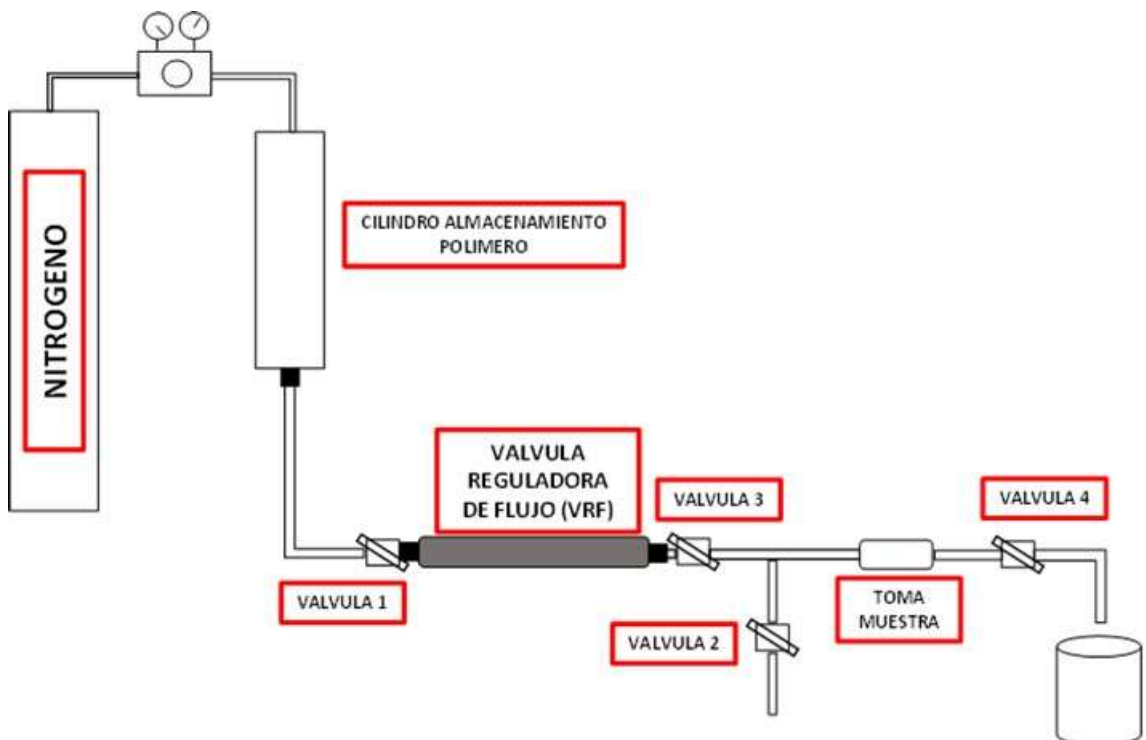
El montaje del banco de prueba experimental mantiene este principio de medición pero se realizan unos ajustes para acoplar dentro del sistema la válvula reguladora de flujo la cual reemplaza al capilar, con el objetivo de

cuantificar la degradación de la solución polimérica a su paso por la válvula reguladora de flujo a varias configuraciones de su cuerpo dinámico interno.

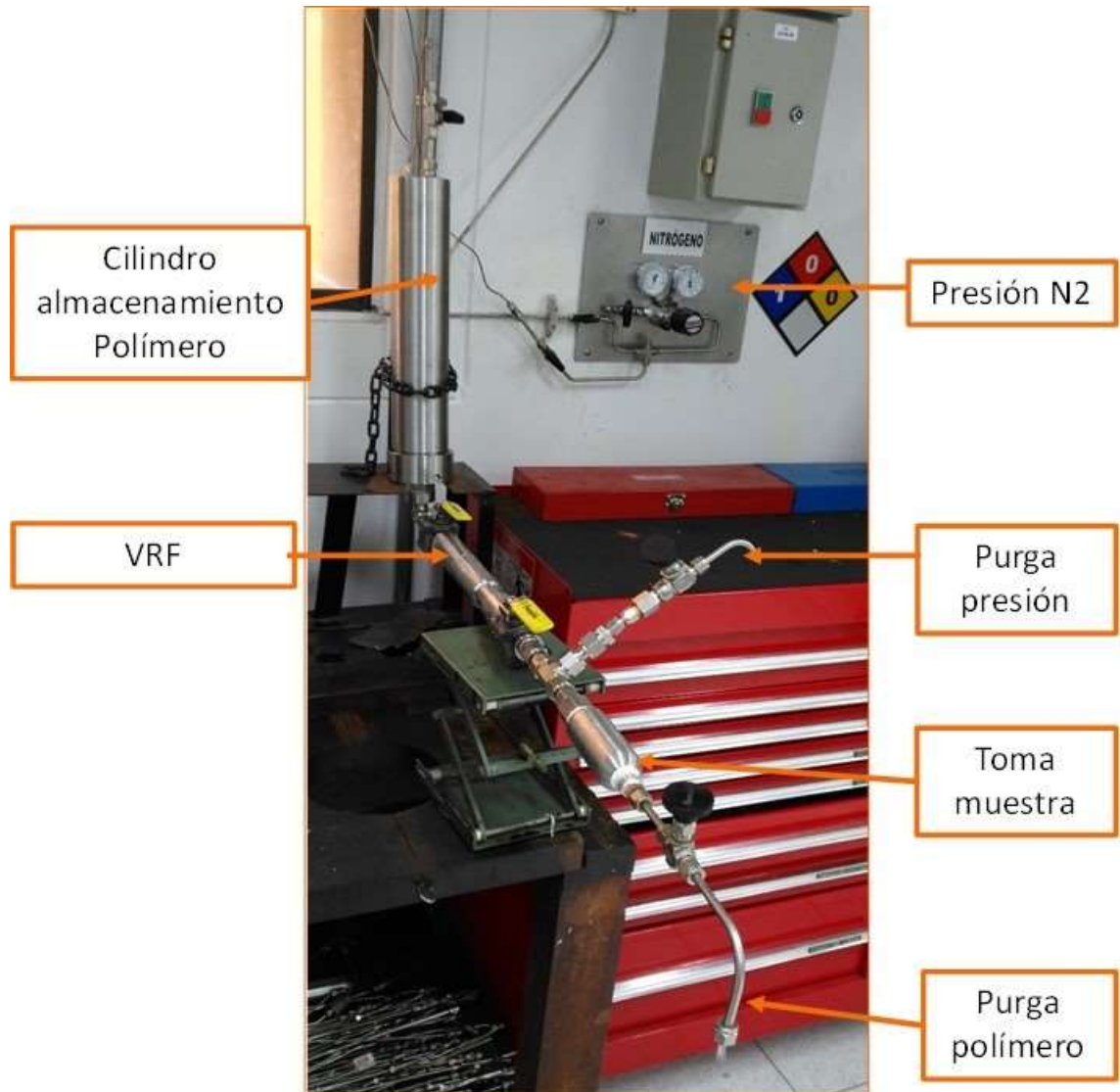
Este esquema se compone de un sistema de nitrógeno de alta presión que permite manejar presiones hasta de 1500 psi, conectado a un cilindro de 900 ml donde se almacena el polímero a desplazar. Este cilindro se conecta con una tubería de ½ pulgada de diámetro hasta la entrada de la válvula reguladora de flujo. A la salida de la válvula reguladora se acopla un cilindro toma muestra de 75 ml y unas válvulas para purga de presión y purga de la solución polimérica.

En las Figura 24 y 25 se presenta la configuración del montaje del banco de prueba experimental propuesto.

**Figura 24. Esquema de medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de válvulas reguladoras de flujo.**



**Figura 25. Configuración equipo de medición de degradación mecánica de soluciones poliméricas a través de válvulas reguladoras de flujo.**



**3.3.2 Procedimiento de medición de viscosidad del polímero.** El objetivo de este procedimiento es medir la viscosidad de la solución polimérica antes y después de su paso a través de la válvula reguladora de flujo dado que en esta es donde se requiere conocer cuál es el porcentaje de pérdida de viscosidad.

La determinación de viscosidad se realiza empleando un viscosímetro Brookfield modelo LVT con adaptador UL (Figura 26), a la velocidad deseada y

a la temperatura requerida, según corresponda dependiendo de la solución polimérica y las condiciones de campo (ambiente, yacimiento, etc.).

### Procedimiento<sup>28</sup>

- Introducir 16 mL de solución polimérica a analizar en la copa del viscosímetro.
- Ajustar la temperatura al valor requerido usando el baño termostático.
- Permitir que el spindle gire hasta que la aguja del viscosímetro se estabilice (aproximadamente 10 min, velocidad del Spindle es igual a 6 rpm o 7.3 s<sup>-1</sup>).
- Registrar la viscosidad en centipoises leída directamente del equipo (Valor leído cuando la velocidad del Spindle es 6 rpm).
- Si la viscosidad es leída a velocidad de 30 rpm, la viscosidad en centipoises estará dada por la relación: Viscosidad = Valor leído / 5 (en cps).

**Figura 26. Equipo de medición de viscosidad.**



**3.3.3 Procedimiento para el desplazamiento de solución polimérica a través de la válvula reguladora de flujo.** El procedimiento se diseñó con el fin de representar las condiciones reales de operación en fondo de pozo cuando el

<sup>28</sup> Norma API RP 63. Sección 3.3 – Medición de propiedades reológicas.

polímero atraviesa la válvula reguladora de flujo antes de entrar a la formación. Con este desplazamiento se podrá cuantificar la pérdida de viscosidad de la solución polimérica.

Usando el montaje presentado en las Figuras 24 y 25, se realizan los desplazamientos siguiendo el procedimiento que se explica a continuación.

### Procedimiento

- A la solución polimérica sometida a este procedimiento se le mide previamente viscosidad a  $7.3 \text{ s}^{-1}$  a temperatura ambiente.
- Adicionar dentro del cilindro 800 ml de solución polimérica previamente preparada a las condiciones requeridas.

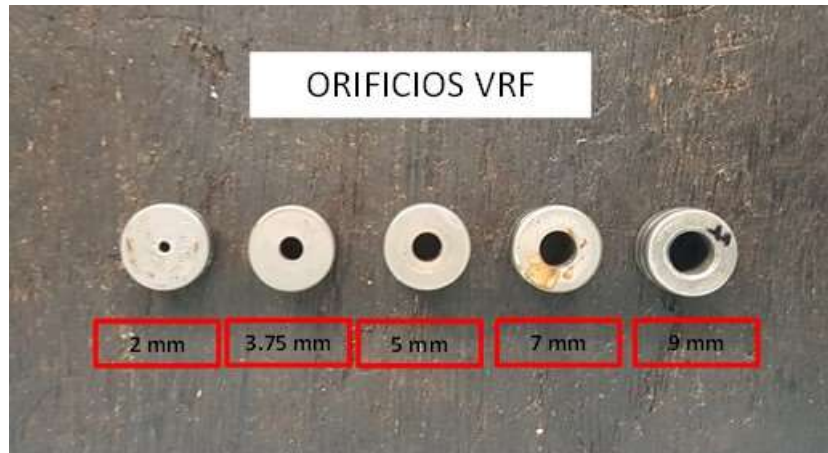


- Acoplar el cilindro a la línea de presión de nitrógeno, previamente ajustada a la presión de trabajo requerida.



- Configurar la válvula reguladora de flujo (VRF) a las condiciones de cuerpo dinámico requerido. (Ver sección 2.3.2)





- Conectar la válvula reguladora de flujo (VRF) a la base del cilindro que contiene el polímero.



- Acoplar a la salida de la válvula reguladora de flujo el cilindro toma muestra.



- Abrir las válvulas 1, 3 y 4, coleccionar aproximadamente 600 ml de solución polimérica en una probeta previamente pesada, simultáneamente determinar el tiempo que tarda en recolectarse la muestra, pesar la muestra y calcular el caudal.



- Cerrar las válvulas y proceder a purgar presión abriendo la válvula 2.
- Abrir la válvula 3 y coleccionar 75 ml de la solución polimérica contenida en él toma muestra.



- Medir la viscosidad de la solución polimérica final a  $7.3 \text{ s}^{-1}$  a temperatura ambiente.



- Realizar cálculo de tasa de corte según ecuación 15.
- Realizar cálculo de porcentaje de pérdida de viscosidad de acuerdo a la ecuación 16.

$$\% \text{ Pérdida de Viscosidad} = \frac{\mu_i - \mu_f}{\mu_i} * 100 \quad (16)$$

Donde:

$\mu_i$ : Viscosidad inicial, cp (medida a 7.3 Seg<sup>-1</sup>)

$\mu_f$ : Viscosidad final, cp (medida a 7.3 Seg<sup>-1</sup>)

- Realizar cálculo del porcentaje de degradación de la solución polimérica de acuerdo a la ecuación 17.

$$\% \text{ Degradación del polímero} = \frac{\mu_i - \mu_f}{\mu_i - \mu_w} * 100$$

**( 17 )**

Donde:

$\mu_i$ : Viscosidad inicial, cp (medida a 7.3 Seg<sup>-1</sup>)

$\mu_f$ : Viscosidad final, cp (medida a 7.3 Seg<sup>-1</sup>)

$\mu_w$ : Viscosidad agua, cp (1 cp a 20°C)

## 4 DISEÑO EXPERIMENTAL APLICADO AL CAMPO YARIGUI

El presente capítulo incluye la definición de las variables independientes y la configuración o combinación de estas variables para realizar los desplazamientos de la solución polimérica a través de la válvula reguladora de flujo a las condiciones de operación del proceso de inyección de polímero efectuado en el campo Yariguí.

### 4.1 DEFINICION DE VARIABLES INDEPENDIENTES

La degradación del polímero se debe a diferentes factores tanto mecánicos, químicos y térmicos previamente mencionados en el capítulo 1. La viscosidad del polímero está directamente relacionada con la salinidad del agua de inyección, la concentración del polímero, temperatura, presión de desplazamiento. Estos parámetros fueron seleccionados como variables independientes porque afectan la viscosidad pero entre si no están relacionados directamente.

**4.1.1 Salinidad agua de inyección.** En el campo Yariguí se cuenta con dos fuentes de agua para preparar el polímero las cuales son agua de captación y agua de producción. Estas dos tienen una diferencia considerable en la salinidad, el agua de captación procedente de pozos captadores es un agua dulce con una concentración de 100 mg/L NaCl, mientras que el agua de producción tiene una concentración de 14000 mg/L NaCl. Según lo analizado en el capítulo 1 la salinidad del agua influye directamente en la viscosidad, a mayor salinidad se debe usar una concentración más alta de polímero para alcanzar la viscosidad objetivo y a menor salinidad del agua la concentración de polímero es menor (Figura 10).

Para los desplazamientos se usó una salmuera sintética preparada en laboratorio que representa la salinidad de 100 ppm correspondiente al agua de

captación dado que con esta agua se está desarrollando el piloto en el campo Yariguí.

**4.1.2 Concentración del polímero.** La concentración del polímero y la salinidad del agua de inyección determinan la viscosidad de la solución polimérica. Para el campo Yariguí la viscosidad objetivo de la solución polimérica es de 20 cp y fue definida para obtener una relación de movilidad cercana a 1.

La salinidad de las salmuera a usar se especificó anteriormente y para alcanzar la viscosidad objetivo se debe adicionar una concentración de polímero dependiendo de esta. Para el agua de captación la concentración de polímero debe ser de 500 ppm, y además se evaluara concentraciones adicionales de 300 y 800 ppm.

El polímero usado durante el piloto en campo pertenece a la compañía SNF (FP 3230) y será el mismo para realizar las pruebas de desplazamiento en el laboratorio.

**4.1.3 Temperatura.** Para definir la temperatura de evaluación se realizaron unas pruebas preliminares de desplazamiento de solución polimérica a través de la VRF y se observó que el porcentaje de pérdida de viscosidad es la misma a 30 y 60 °C. De esta evaluación se concluyó realizar las mediciones de viscosidad sólo a la temperatura de 30 °C, teniendo en cuenta que a esta temperatura se tiene una mayor viscosidad.

**4.1.4 Presión de desplazamiento.** Esta presión refleja las condiciones reales de operación de la válvula reguladora de flujo como se explicó en el capítulo 2. En condiciones de laboratorio se utilizó una presión de 600 psi, la cual es lo suficientemente grande para proporcionar el funcionamiento de la válvula reguladora de flujo.

**4.1.5 Configuración del cuerpo dinámico de la válvula reguladora de flujo.** En el cuerpo dinámico se lleva a cabo la regulación del caudal por lo cual se convierte en la parte más importante de la válvula. El caudal de agua que pasa por el regulador permanece constante según el tamaño del orificio fijo y la tensión del resorte, independientemente de las variaciones de presión. En la Figura 21 se pueden observar todas las partes que conforman el cuerpo dinámico de las válvulas reguladoras de flujo.

Para los desplazamientos se utilizaron diferentes tamaños de orificios para representar los posibles escenarios de regulación de caudal de la solución polimérica. Los diámetros seleccionados son: 2, 3.75, 5, 6, 7, 9 mm, además se realizó un desplazamiento adicional sin orificio el cual es llamado full open (FO). El resorte seleccionado para estos orificios es el rojo según la tabla 1.

## **4.2 CONFIGURACION DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Se realiza un diseño factorial para comprender el efecto de dos o más variables independientes respecto de una única variable dependiente. Los diseños factoriales son combinaciones entre los niveles de las diferentes variables escogidas, en este caso se obtendrían las siguientes combinaciones: a1b1, a1b2, a1b3, a1b4, a1b5, a1b6, a1b7, a2b1, a2b2, a2b3, a2b4, a2b5, a2b6, a2b7, a3b1, a3b2, a3b3, a3b4, a3b5, a3b6, a3b7 (Tabla 2)

**Tabla 2. Diseño factorial.**

FACTOR	NIVEL
X	a1
	a2
	a3
Y	b1
	b2
	b3
	b4
	b5
	b6
	b7

Para este caso la variable dependiente es la viscosidad y las variables independientes seleccionadas son la concentración del polímero y el tamaño del orificio de la válvula reguladora de flujo. En la tabla 3 se presenta el diseño experimental a realizar donde al combinar los factores se tendrían un total de 21 pruebas experimentales a ejecutar.

**Tabla 3. Pruebas de desplazamiento de solución polimérica a través de válvulas reguladoras de flujo aplicado al campo Yariguí.**

FACTOR	NIVEL
Concentración del polímero	300 ppm
	500 ppm
	800 ppm
Tamaño del orificio de la válvula reguladora de flujo	2 mm
	3.75 mm
	5 mm
	6 mm
	7 mm
	9 mm
	Full Open "FO"

## 5 ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados y análisis obtenidos en las pruebas experimentales realizadas según se explicó en el capítulo 4.

### 5.1 RESULTADOS DEGRADACIÓN DE POLÍMERO BANCO DE PRUEBA EXPERIMENTAL

A modo de aseguramiento y validación de las pruebas experimentales se aseguró repetitividad y reproducibilidad de los datos obtenidos de, donde la repetitividad es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo las mismas condiciones de medición, y la reproducibilidad es la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando bajo condiciones de medición que cambian<sup>29</sup>.

Se efectuaron duplicados de viscosidad de todo el set de pruebas (repetitividad) y la solución madre se diluyó en concentraciones de polímero de 300, 500 y 800 ppm, y con estas diluciones se hicieron los respectivos desplazamientos a diferentes orificios de regulación 2, 3.75, 5, 6, 7, 9 mm y FO en las válvulas reguladoras de flujo (Reproducibilidad).

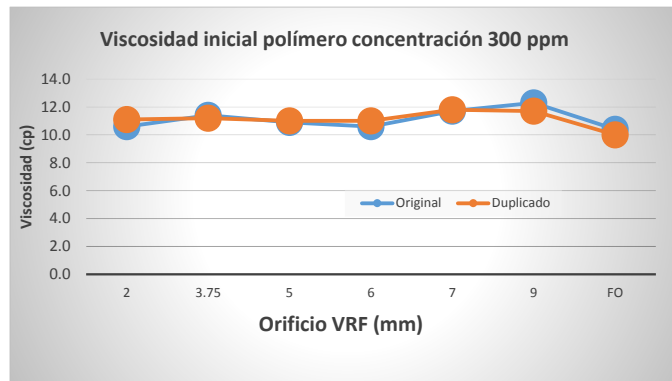
En las figuras 26, 27 y 28 se muestran las gráficas de los valores de repetitividad de la viscosidad inicial calculada a las diferentes concentraciones de polímero evaluadas.

Se puede apreciar de forma general un adecuado ajuste de los datos originales y duplicados, en los casos donde se aprecia una desviación, esta no supera el 2% de diferencia.

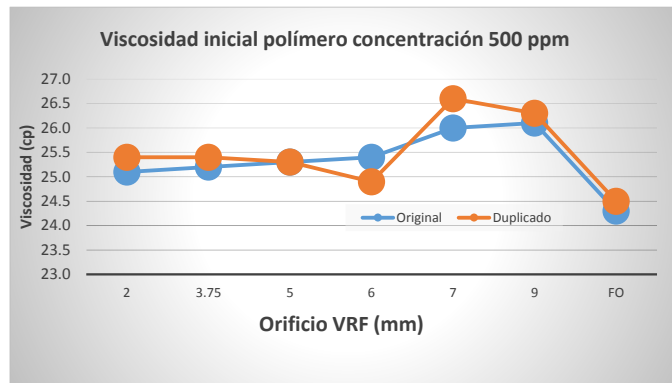
---

<sup>29</sup> MONTGOMERY D. "Diseño y Análisis de Experimentos", 2da Ed. Universidad Estatal de Arizona, Limusa Wiley, 2004.

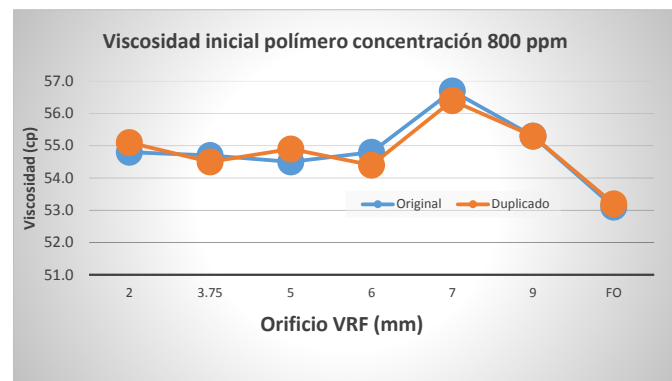
**Figura 27. Validación medición de viscosidad inicial concentración 300 ppm.**



**Figura 28. Validación medición de viscosidad inicial concentración 500 ppm.**



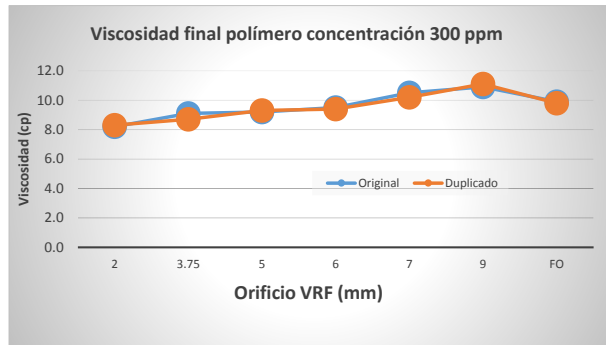
**Figura 29. Validación medición de viscosidad inicial concentración 800 ppm.**



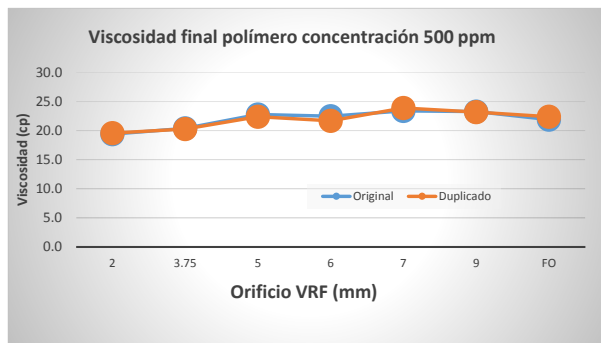
Esta validación de viscosidad también se realizó para los datos finales de viscosidad obtenidos después de realizar los desplazamientos a través de las

válvulas reguladoras de flujo a diferentes orificios. En las figuras 30, 31 y 32 se presenta las gráficas de estos resultados observando un muy buen ajuste entre las mediciones originales y los duplicados.

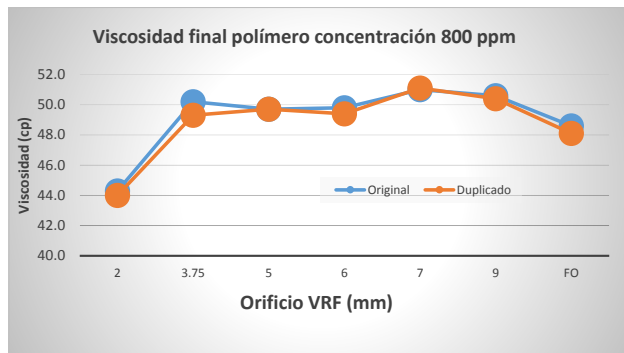
**Figura 30. Validación medición de viscosidad final concentración 300 ppm.**



**Figura 31. Validación medición de viscosidad final concentración 500 ppm.**



**Figura 32. Validación medición de viscosidad final concentración 800 ppm.**

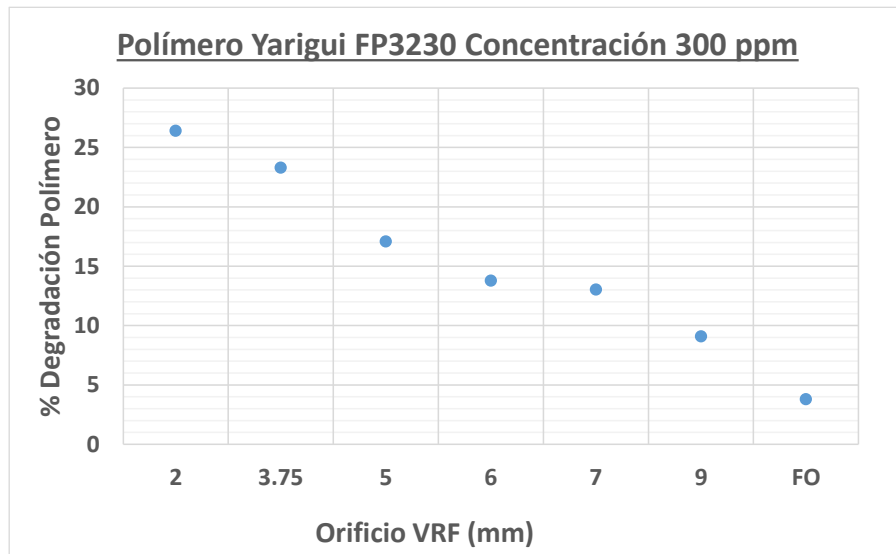


El objetivo principal de este trabajo consiste en cuantificar la degradación mecánica del polímero a diferentes condiciones en el cuerpo dinámico de las válvulas reguladoras de flujo VRF (orificios), para lo cual se realizaron las pruebas de desplazamiento mencionadas en el capítulo 4. El porcentaje de degradación de polímero se calculó usando la ecuación 17, donde las viscosidades usadas fueron promediadas entre el valor original y duplicado para obtener un solo valor de viscosidad inicial y final. En las figuras 33, 34 y 35 se presentan las gráficas del porcentaje de degradación del polímero en función de los diferentes orificios de regulación de las VRF, lo anterior a las concentraciones de polímero de 300, 500 y 800 ppm.

Según Maerker (1975) esta degradación se produce cuando el polímero que se disuelve en solución se somete a altas velocidades de cizallamiento. Todos los polímeros disueltos degradan mecánicamente si se somete a una velocidad de cizallamiento de flujo suficientemente alta. Durante las pruebas experimentales realizadas al inyectar polímero a través de las VRF existen tasas de corte (Shear Rate) altas que ocasionan la degradación mecánica del polímero.

Para una concentración de 300 ppm se observa como a medida que el orificio de la VRF se reduce desde el máximo valor (FO) hasta un orificio de 2 mm de diámetro, el porcentaje de degradación del polímero aumenta alcanzado valores de 26 % de degradación.

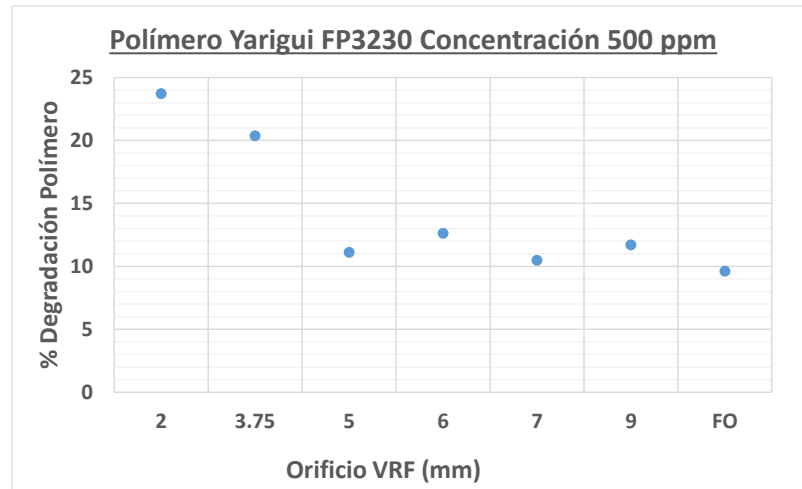
**Figura 33. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF a una concentración de 300 ppm.**



La solución polimérica de 300 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificios 2 y 3.75 mm la pérdida de viscosidad esta entre el 23 y 26 %, en desplazamientos con orificio de 5 mm muestra una pérdida de viscosidad de 17% y para orificios de 6, 7 y 9 mm presentan una pérdida de viscosidad entre el 9 y 14 %. La solución polimérica en desplazamientos a través de la VRF sin orificio “Full Open” presenta solo un 4 % de pérdida de viscosidad.

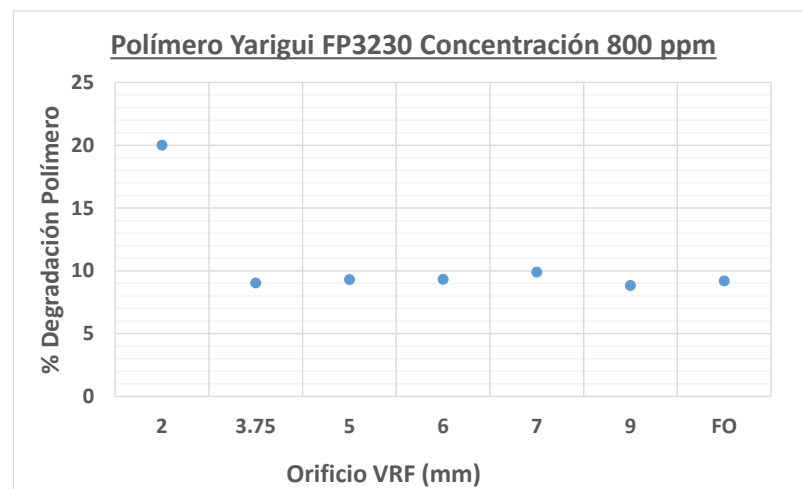
En la figura 34 se presentan los resultados de degradación del polímero para una concentración de 500 ppm, donde se aprecia que la pérdida de viscosidad aumenta a medida que disminuye el diámetro de los orificios de la VFR. Los orificios de 2 y 3.75 mm evaluados a una concentración de polímero de 500 ppm presentan perdidas de viscosidad entre el 20 y 24%. En desplazamientos con orificios mayores a 5 mm (5, 6, 7 y 9 mm) presentan una pérdida de viscosidad promedio del 11% y en desplazamientos a través de la VRF sin orificio “Full Open” presenta un 10 % de pérdida de viscosidad.

**Figura 34. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF a una concentración de 500 ppm.**



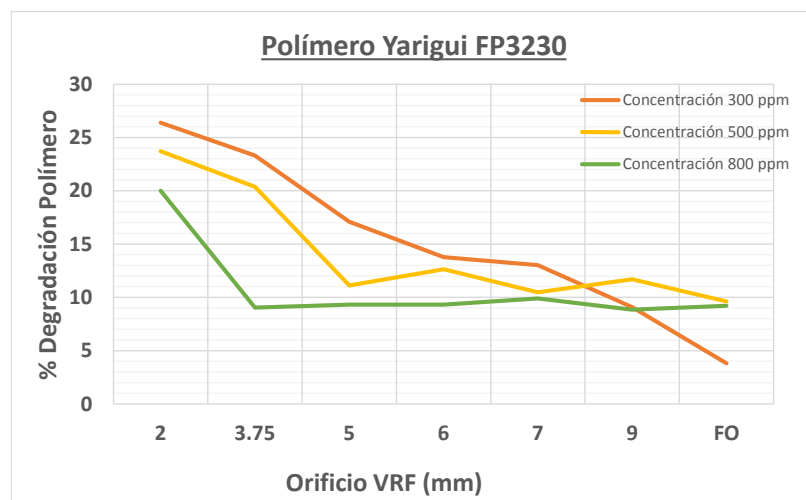
La solución polimérica de 800 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificio de 2 mm muestra una pérdida de viscosidad de 20%, en orificios de 3.75, 5, 6, 7, 9 mm y FO presentan pérdidas de viscosidad menores al 10%. (Figura 35).

**Figura 35. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF a una concentración de 800 ppm.**



En la figura 36 se comparan los resultados obtenidos para las tres (3) concentraciones evaluadas, donde se puede analizar que la degradación del polímero esta también relacionada con la concentración, según Sorbie (1991) la viscosidad aumenta en función de la concentración del polímero, por ende a concentraciones de 800 ppm se obtuvieron los valores más altos de viscosidad (Figura 29 y 32). En términos de porcentaje de degradación del polímero se observa que este es menor cuando la concentración del polímero aumenta, por lo cual a concentraciones de 500 y 800 ppm para orificios menores a 7 mm se obtienen porcentajes de degradación más bajos que los obtenidos a una concentración de 300 ppm.

**Figura 36. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF variando concentración de polímero.**



Utilizando la ecuación 15 se calculó la tasa de corte (Shear rate) para cada prueba de desplazamiento realizada a las diferentes concentraciones de polímero y los diferentes orificios de las VRF evaluados, en la tabla 4 se presentan los datos y resultados obtenidos.

**Tabla 4. Resultados pruebas de desplazamiento de solución polimérica a través de válvulas reguladoras de flujo aplicado al campo Yariguí.**

Concentración de Polímero	Orificio	Viscosidad Inicial		Viscosidad de Cizalla		% pérdida viscosidad 30°C	% Degradación Polímero 3230 Yariguí	Volumen	tiempo	tasa	Caudal durante prueba	Shear Rate	R
ppm	mm	30°C [cP]		30°C [cP]		[%]	[%]	[mL]	[s]	[mL/s]	[BPD]	S-1	cm
300	2	10.6	11.1	8.2	8.3	24.0	26	620.0	15.0	41.4	22.5	52697	0.1
300	3.75	11.4	11.2	9.1	8.7	21.2	23	550.0	8.7	63.1	34.3	12197	0.1875
300	5	10.9	11	9.2	9.3	15.5	17	530	7.78	68.1	37.0	5551	0.25
300	6	10.6	11	9.5	9.4	12.5	14	580	8.74	66.4	36.1	3129	0.3
300	7	11.7	11.8	10.5	10.2	11.9	13	610	9.56	63.8	34.7	1895	0.35
300	9	12.3	11.7	10.9	11.1	8.3	9	568	8.74	65.0	35.3	908	0.45
300	FO	10.4	10	9.9	9.8	3.4	4	625	9.7	64.4	35.0	656	0.5
500	2	25.1	25.4	19.4	19.6	22.8	24	690.0	15.0	46.2	25.1	58765	0.1
500	3.75	25.2	25.4	20.4	20.3	19.6	20	603.0	9.3	65.0	35.3	12564	0.1875
500	5	25.3	25.3	22.8	22.4	10.7	11	600	8.72	68.8	37.4	5607	0.25
500	6	25.4	24.9	22.5	21.7	12.1	13	570	8.78	64.9	35.3	3061	0.3
500	7	26	26.6	23.4	23.9	10.1	10	620	8.91	69.6	37.8	2066	0.35
500	9	26.1	26.3	23.3	23.2	11.3	12	600	8.89	67.5	36.7	943	0.45
500	FO	24.3	24.5	21.9	22.4	9.2	10	590	8.79	67.1	36.5	684	0.5
800	2	54.8	55.1	44.3	44.0	19.7	20	640.0	15.3	41.8	22.7	53225	0.1
800	3.75	54.7	54.5	50.2	49.3	8.9	9	550.0	8.7	63.1	34.3	12183	0.1875
800	5	54.5	54.9	49.7	49.7	9.1	9	570	7.87	72.4	39.4	5902	0.25
800	6	54.8	54.4	49.8	49.4	9.2	9	605	9.21	65.7	35.7	3098	0.3
800	7	56.7	56.4	51	51.1	9.7	10	610	9.8	62.2	33.8	1848	0.35
800	9	55.3	55.3	50.6	50.4	8.7	9	605	10.46	57.8	31.4	808	0.45
800	FO	53.1	53.2	48.6	48.1	9.0	9	595	8.71	68.3	37.1	696	0.5

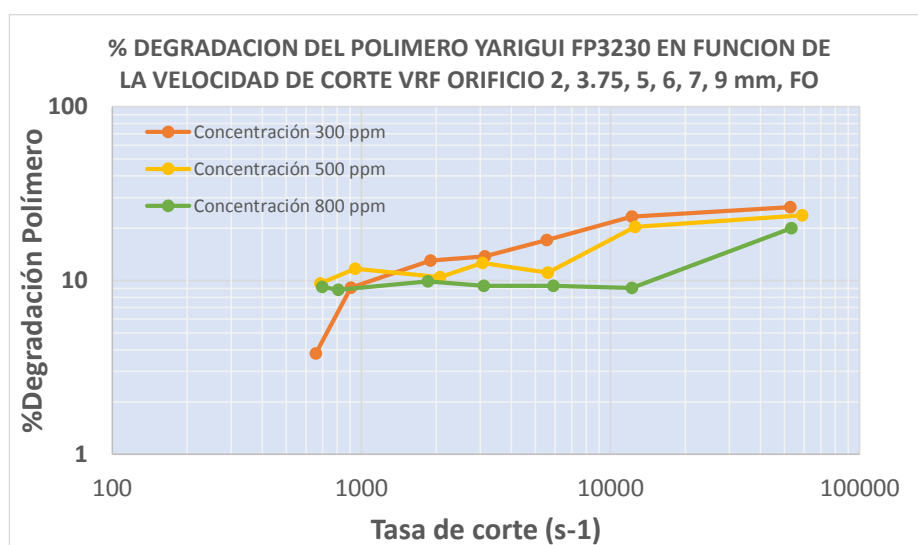
El porcentaje de degradación de polímero en función de la tasa de corte (Shear rate) Figura 37, muestra que a mayor tasa de corte se incrementa el porcentaje de degradación de la solución polimérica y estas altas tasas de corte se presentan en los desplazamientos con orificios VRF de menor diámetro.

Para una concentración de 300 ppm a tasas de corte mayores de  $10000 \text{ s}^{-1}$  la solución polimérica se ve mayormente afectada con degradaciones por encima del 20% llegando hasta valores de 26.4% esto ocurre en orificios VRF de 2 y 3.75 mm. A tasas de corte menores de  $6000 \text{ s}^{-1}$  la solución polimérica se ve menos afectada con degradaciones por debajo del 17% llegando hasta valores de solamente 4% esto ocurre en orificios VRF mayores de 5 mm hasta Full open (FO).

En los desplazamientos de solución polimérica a 500 ppm de concentración se observa que para orificios VRF de 2 y 3.75 mm la tasa de corte es mayor de  $10000 \text{ s}^{-1}$  con degradaciones del polímero entre el 20% y 24%. Para los orificios de 5, 6, 7, 9 mm y FO la degradación promedio es de 11% a tasas de corte menores de  $6000 \text{ s}^{-1}$ .

En la concentración de 800 ppm a tasas de corte menores de 12000 s<sup>-1</sup> el porcentaje de degradación del polímero es menor del 10% para todos los orificios VRF evaluados excepto para el orificio de 2 mm que presenta una degradación del polímero de 20% a una tasa de corte superior a 50000 s<sup>-1</sup>.

**Figura 37. % Degradación del polímero a diferentes orificios de regulación de las VRF en función de la tasa de corte (Shear rate).**



## 5.2 MODELO MATEMÁTICO

El análisis de regresión tiene como objetivo modelar en forma matemática el comportamiento de una variable de respuesta en función de una o más variables independientes o factores. Si mediante un modelo matemático es posible describir tal relación, entonces este modelo puede usarse para propósitos de predicción, optimización o control. Para estimar los parámetros de un modelo de regresión son necesarios datos, los cuales pueden obtenerse de experimentos planeados, de observaciones de fenómenos no controlados, o de registros históricos<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> GUTIÉRREZ, H. "Análisis y diseño de experimentos" McGraw-Hill Interamericana. (3a. ed.) Página 313, 2012

La regresión puede ser de tipo lineal simple, lineal múltiple, polinomial, entre otros; realizar este tipo de análisis sirve como parámetro de calidad del modelo. Si se tiene una nube de puntos, podría existir un modelo teórico conocido que pueda ajustarse a los datos experimentales. Una vez se tienen los puntos y el modelo se debe establecer la discrepancia entre los valores observados y los esperados, es decir, establecer la bondad de ajuste del modelo y determinar si estos son correctos.

El análisis de regresión consiste en encontrar un modelo matemático que relaciona los valores medidos de un conjunto de variables. Los valores medidos en el mundo real nunca se ajustan de forma perfecta a un modelo, debido en primer lugar a errores de medida, pero también a que cualquier modelo matemático es una simplificación del mundo real, y si tuviera en cuenta todos los factores que influyen en un conjunto de variables, sería inmanejable.

Por tanto, no tiene sentido aspirar a encontrar un modelo que prediga exactamente los valores medidos, y debemos admitir que el modelo cometerá un cierto error. Un modelo matemático útil encuentra una relación funcional sencilla en conjuntos de pocas variables.

Para encontrar el modelo matemático que pueda relacionarnos el porcentaje de degradación de polímero en función de los diferentes orificios de las válvulas reguladoras de flujo a diferentes concentraciones de polímero, se realizara el siguiente procedimiento con la ayuda del programa "Curve Expert":

- Tabular los datos experimentales obtenidos donde la variable "X" será los tamaños de orificios de las válvulas reguladoras de flujo y la variable "Y" es el porcentaje de degradación del polímero.
- Construir una gráfica de la degradación de polímero en función de los orificios de la válvula reguladora de flujo.
- Usando el programa Curve Expert se realiza un análisis de todos los modelos que pueden representar con el máximo coeficiente de

correlación los datos experimentales obtenidos y que representen de manera lógica la tendencia de los datos experimentales.

Con este modelo se puede obtener una predicción del porcentaje de degradación del polímero que se tendrá a cualquier orificio de regulación en el cuerpo dinámico de las válvulas reguladoras de flujo, de esta manera es posible tomar decisiones acertadas de regulación de caudal en el piloto de inyección de polímero en el campo Yariguí.

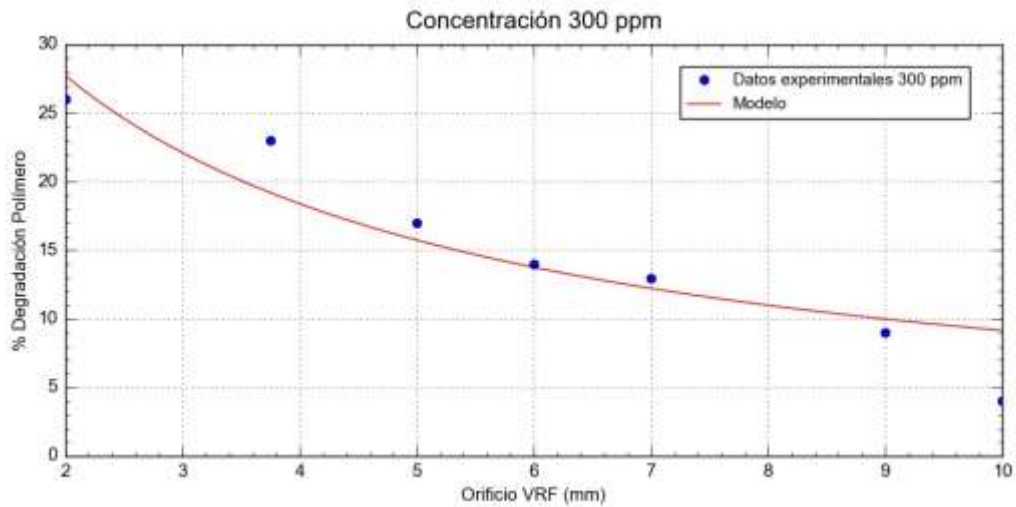
Para las tres (3) concentraciones de polímero evaluadas 300, 500 y 800 ppm el modelo que representa la tendencia de los datos experimentales obtenidos responde a la siguiente forma:

$$y = \frac{a}{(1 + be^{-cx})}$$

**5.2.1 Modelo matemático concentración de polímero 300 ppm.** Para construir este modelo se usaron los resultados obtenidos de las pruebas de desplazamiento con polímero de 300 ppm a diferentes oficios VRF (Tabla 4).

El modelo presenta un coeficiente de correlación de 0.9303. En la figura 38 se presenta el ajuste de los datos experimentales y el modelo obtenido aplicable para el campo Yariguí para una concentración de 300 ppm de polímero FP3230.

**Figura 38. Ajuste datos experimentales para concentración de polímero FP3230 de 300 ppm.**



El modelo matemático para encontrar el porcentaje de degradación de la viscosidad del polímero para una concentración de 300 ppm a diferentes configuraciones del cuerpo dinámico (orificios de regulación de la válvula reguladora de flujo) Figura 39, responde a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Degradación del polímero} = \frac{a}{(1 + be^{-c\phi})} \quad (18)$$

Donde:

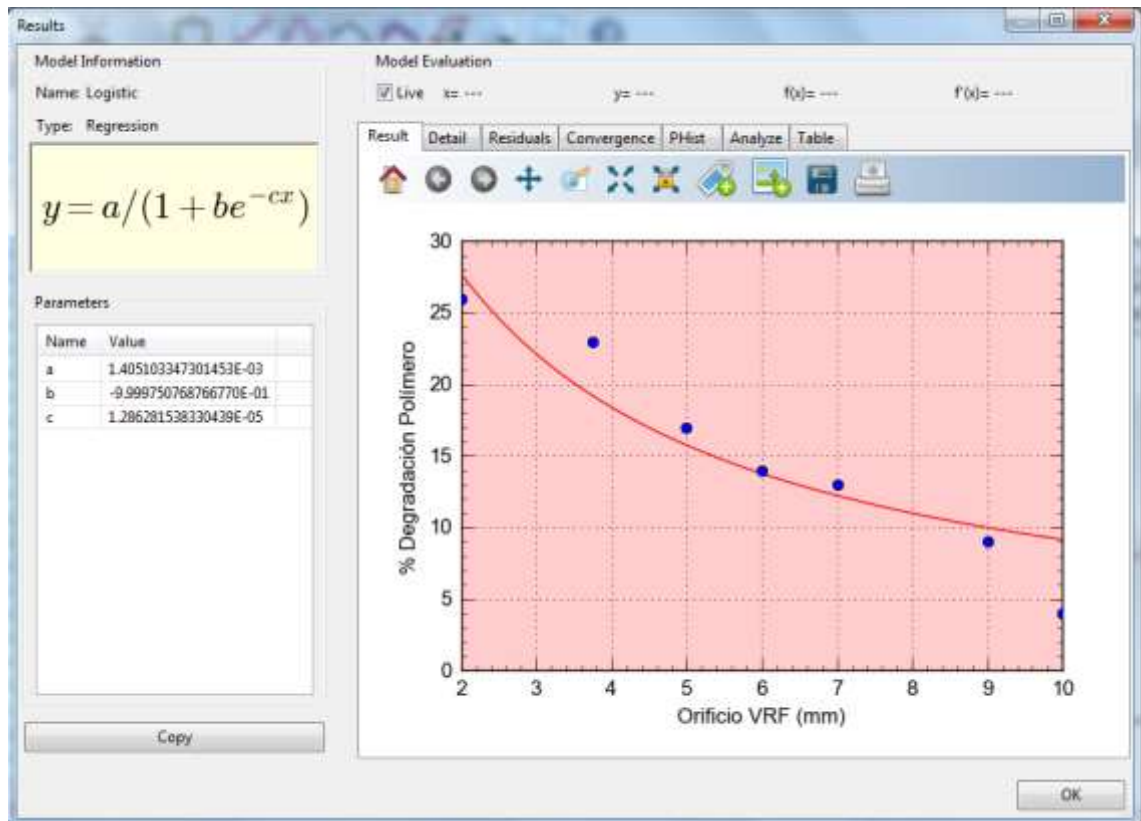
$a$ : 0.001405

$b$ : -0.999975

$c$ : 0.00001286

$\phi$ : Diámetro del orificio de la VRF, mm

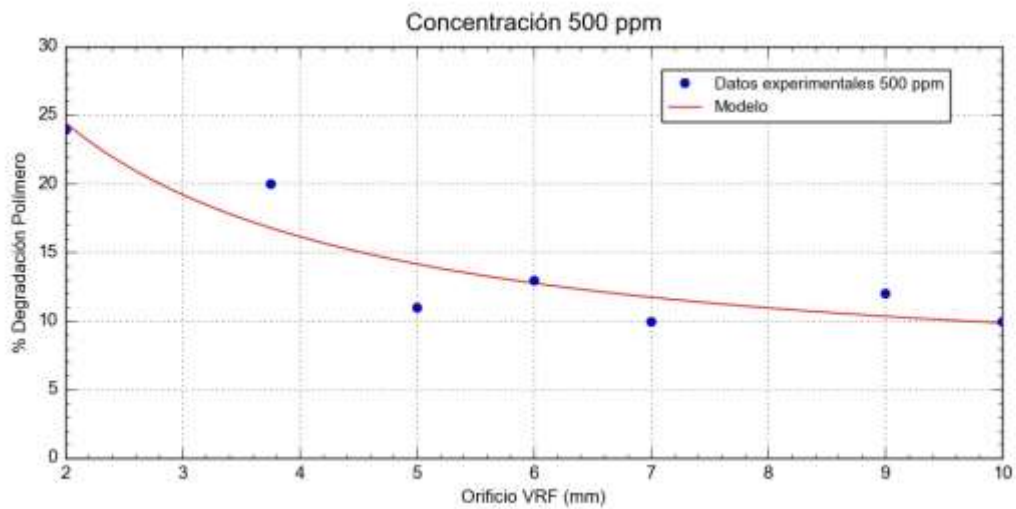
**Figura 39. Modelo matemático para concentración de polímero FP3230 de 300 ppm.**



**5.2.2 Modelo matemático concentración de polímero 500 ppm.** Para construir este modelo se usaron los resultados obtenidos de las pruebas de desplazamiento con polímero de 500 ppm a diferentes orificios VRF (Tabla 4).

El modelo presenta un coeficiente de correlación de 0.92476. En la figura 40 se presenta el ajuste de los datos experimentales y el modelo obtenido aplicable para el campo Yariguí para una concentración de 500 ppm de polímero FP3230.

**Figura 40. Ajuste datos experimentales para concentración de polímero FP3230 de 500 ppm.**



El modelo matemático para encontrar el porcentaje de degradación de la viscosidad del polímero para una concentración de 500 ppm a diferentes configuraciones del cuerpo dinámico (orificios de regulación de la válvula reguladora de flujo) Figura 41, responde a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Degradación del polímero} = \frac{a}{(1 + be^{-c\phi})} \quad (19)$$

Donde:

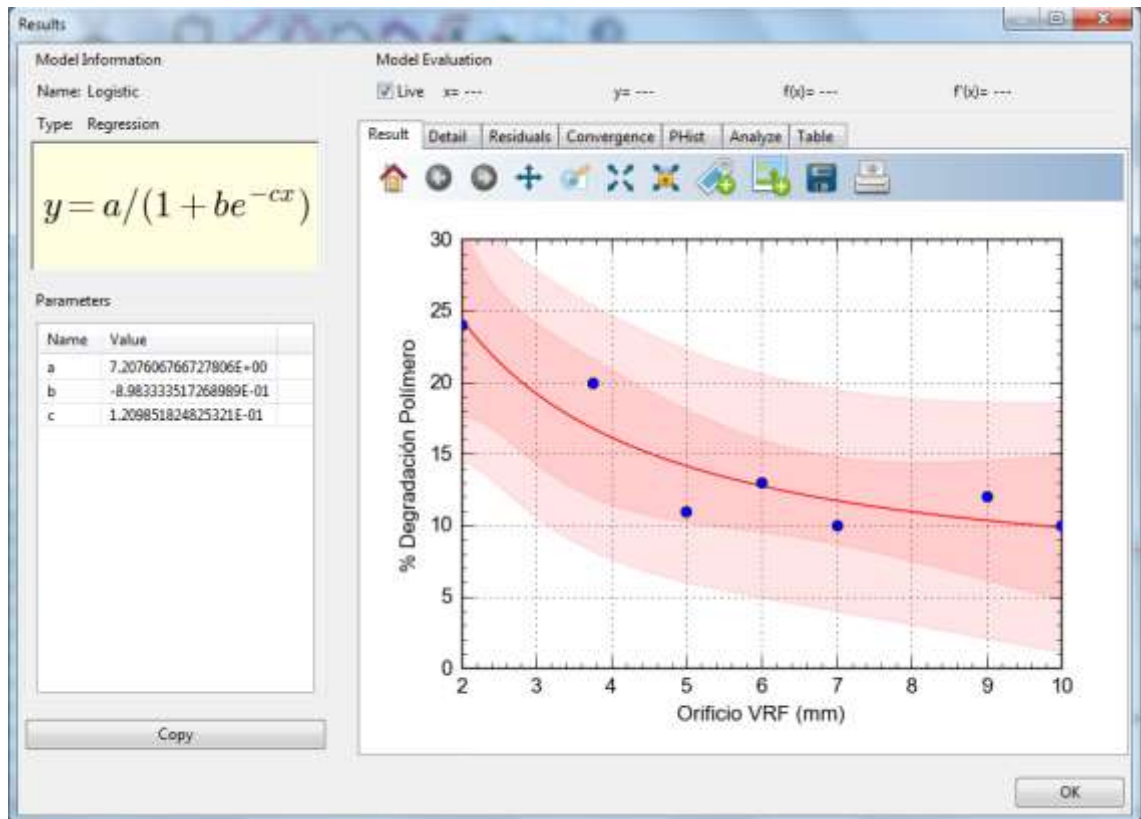
$a$ : 7.207607

$b$ : -0.898333

$c$ : 0.120985

$\phi$ : Diámetro del orificio de la VRF, mm

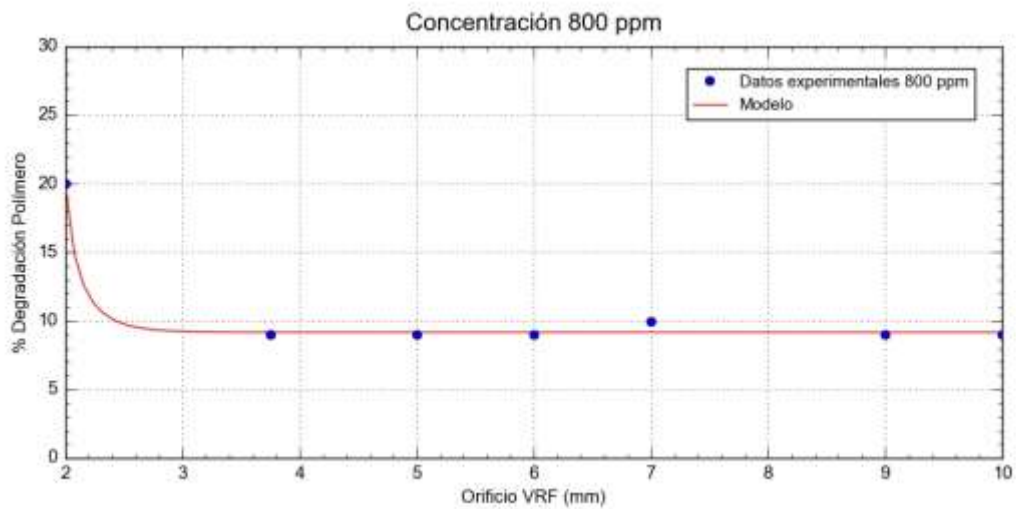
**Figura 41. Modelo matemático para concentración de polímero FP3230 de 500 ppm.**



**5.2.3 Modelo matemático concentración de polímero 800 ppm.** Para construir este modelo se usaron los resultados obtenidos de las pruebas de desplazamiento con polímero de 800 ppm a diferentes oficios VRF (Tabla 4)

El modelo presenta un coeficiente de correlación de 0.9958. En la figura 42 se presenta el ajuste de los datos experimentales y el modelo obtenido aplicable para el campo Yariguí para una concentración de 800 ppm de polímero FP3230.

**Figura 42. Ajuste datos experimentales para concentración de polímero FP3230 de 800 ppm.**



El modelo matemático para encontrar el porcentaje de degradación de la viscosidad del polímero para una concentración de 800 ppm a diferentes configuraciones del cuerpo dinámico (orificios de regulación de la válvula reguladora de flujo) Figura 43, responde a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Degradación del polímero} = \frac{a}{(1 + be^{-c\phi})} \quad (20)$$

Donde:

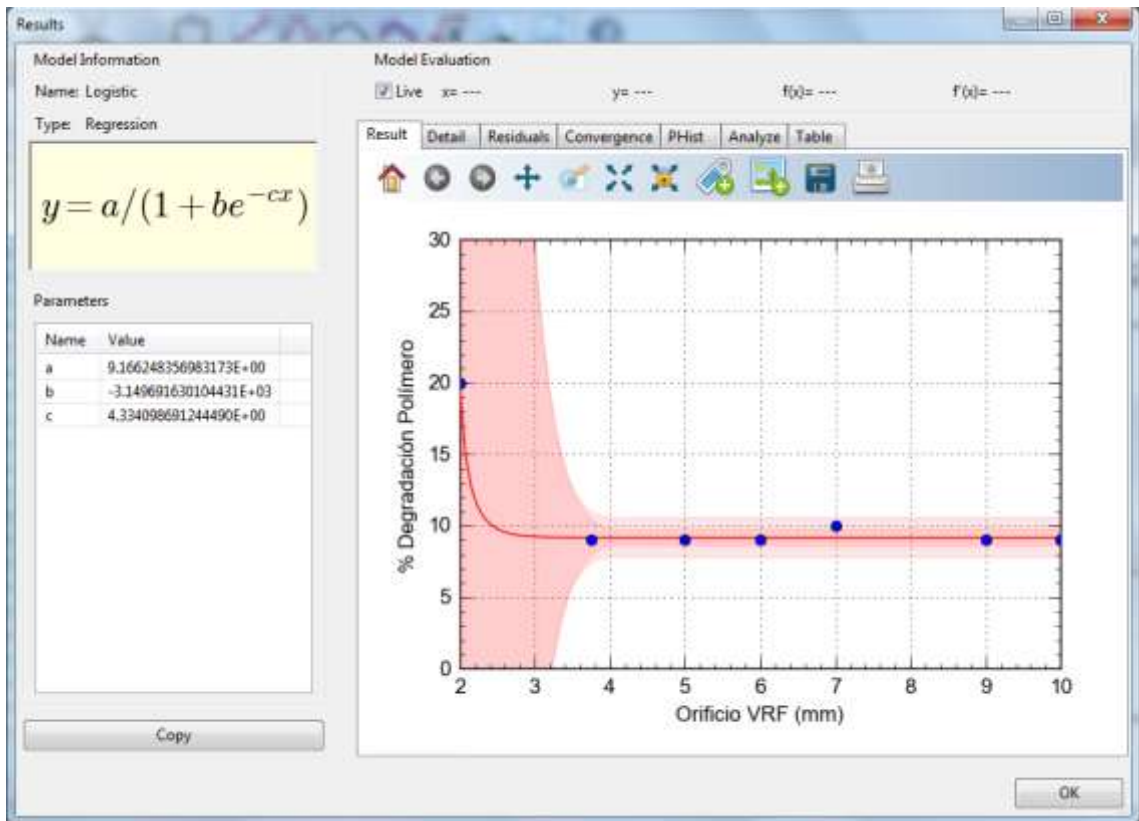
$a$ : 9.166248

$b$ : -3149.691630

$c$ : 4.334099

$\phi$ : Diámetro del orificio de la VRF, mm

Figura 43. Modelo matemático para concentración de polímero FP3230 de 800 ppm.



## **6 INYECCION DE POLIMERO CAMPO YARIGUI**

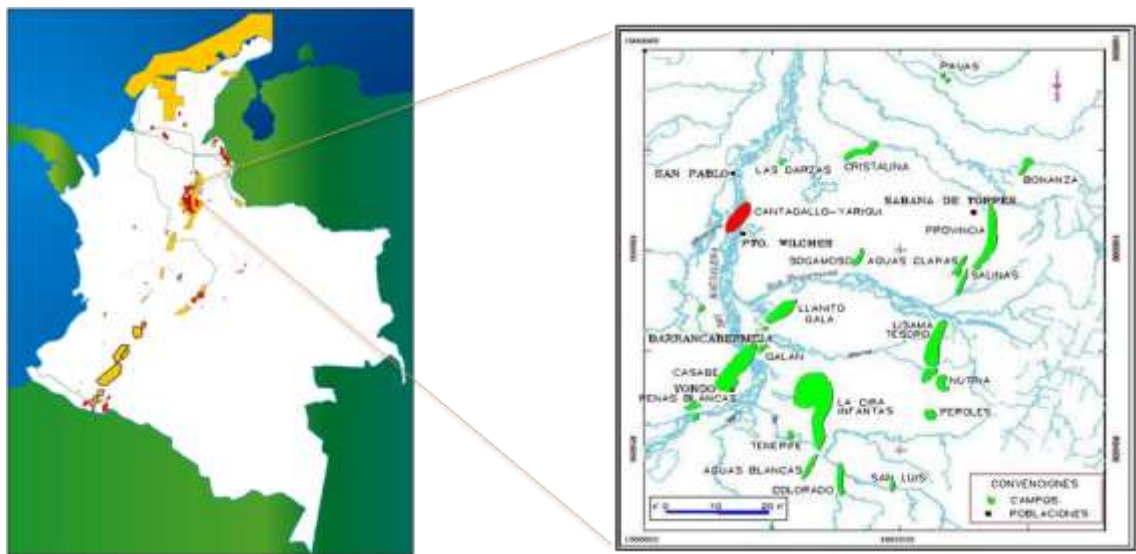
Debido a la alta relación de movilidades del Campo y con el objetivo de evaluar el desempeño y los resultados de la implementación de procesos de recobro mejorado en la Formación La Paz, se llevó a cabo el piloto de inyección de polímero en arenas Cantagallo del bloque V, a través de los pozos inyectoros YR 510 y YR 504. Este proceso de recuperación a etapas tempranas de desarrollo secundario del campo permite mejorar la eficiencia de barrido al reducir el valor de la relación de movilidades (M), de un valor actual de 7 a un valor cercano a 1 mediante el incremento de la viscosidad del agua, buscando la generación de un barrido tipo pistón, minimizando problemas de digitación viscosa, canalización y dificultades de desplazamiento, obteniendo como resultado un mayor factor de recobro.

### **6.1 GENERALIDADES CAMPO YARIGUI**

El Campo Yariguí, se encuentra localizado hacia la parte central del flanco occidental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena en los límites de los departamentos de Santander y Bolívar; a la altura de los municipios de Puerto Wilches (Santander) y Cantagallo (Bolívar), con una extensión aproximada de 14 km<sup>2</sup>, 7 Km de largo por 2 Km de ancho, como se muestra en la Figura 44.

El campo Yariguí fue descubierto en 1941 con la perforación del pozo Cimitarra-1 llamado posteriormente Cantagallo-1. El desarrollo principal del campo en producción primaria se presentó en 1962 cuando alcanzó una producción de 20300 BOPD. En el año 1965 se realizó el primer ensayo de inyección de agua, el cual no presentó pruebas concluyentes. En 1974 se dio la reversión a Ecopetrol de las concesiones Cantagallo y San Pablo.

**Figura 44. Mapa de localización del campo Yariguí.**



Fuente: Plan de desarrollo Campo Yariguí, Ecopetrol, 2015.

En 1995 inició la inyección de aguas residuales (pozo YR-8) y en 2008 inició el proceso de inyección de agua en el norte y centro del Bloque V. En el mes de abril de 2014 se inicia un piloto de inyección de polímeros en dos patrones de inyección del bloque V, y culmina su primera evaluación en el mes de diciembre de 2016<sup>31</sup>.

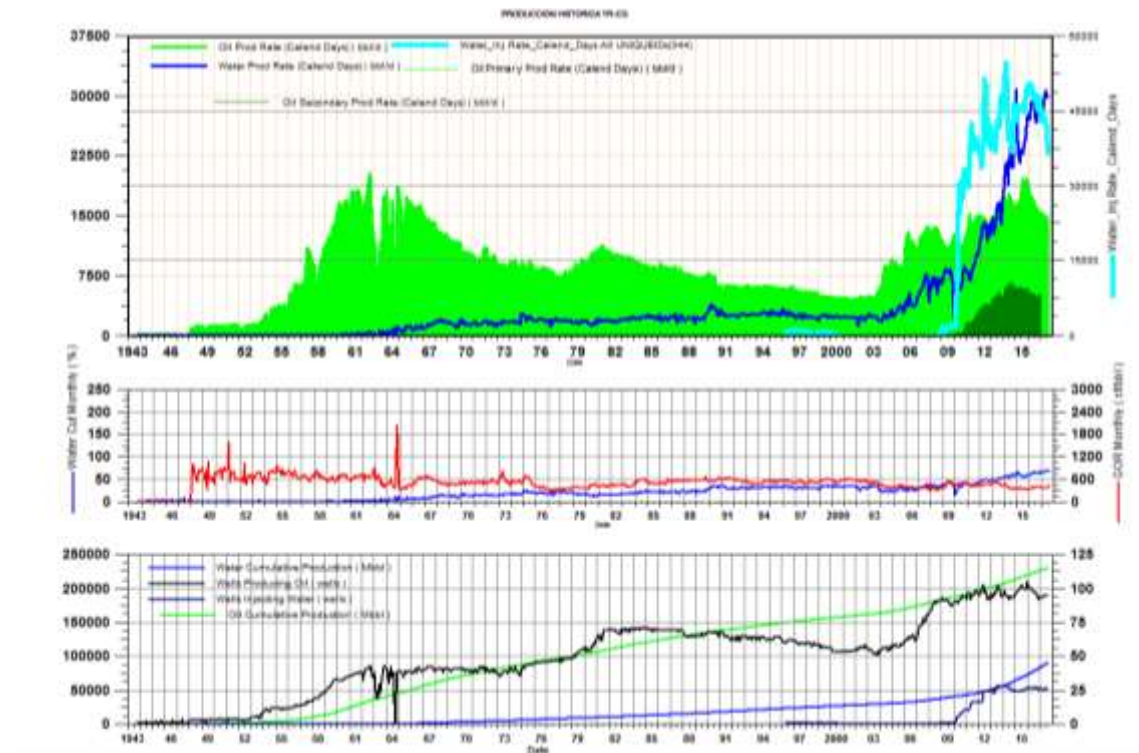
El campo produce de las arenas Cantagallo de la Formación La Paz y de las arenas B3 de la Formación Mugrosa, ambas del Terciario. Con excepción del Bloque IV donde se detecta la presencia de un acuífero activo, el principal mecanismo de producción ha sido el gas en solución. El petróleo producido en el área es un black oil de 20°API, Rsi de 380-420 SCF/STB y viscosidad promedio de 24 cP. La presión inicial del yacimiento fue 3250 psi y la del punto de burbuja 2425 psi.

En la actualidad (Septiembre 2017) el campo cuenta con 96 pozos productores de petróleo activos y 26 inyectores activos, lo cual reporta un volumen de

<sup>31</sup> Plan de desarrollo Campo Yariguí – Cantagallo, Ecopetrol, 2015.

producción de 14068 BOPD, 28367 BWPD (BSW= 67%) y 5543 KSCFD de gas (GOR= 387 SCF/STB); la inyección es de 36700 BWIPD<sup>32</sup>.

**Figura 45. Historia de producción-inyección campo Yariguí.**



Fuente: Plan de desarrollo Campo Yariguí, Ecopetrol.

## 6.2 IMPLEMENTACION PILOTO INYECCION DE POLIMERO CAMPO YARIGUI

Para la implementación del piloto, se realizó una inteligencia de mercado pública que tuvo como objeto Identificar eventuales proveedores del servicio de inyección de soluciones poliméricas. Con esta información se identificaron 3 compañías con experiencia directa en toda la cadena de inyección de soluciones poliméricas (Suministro del polímero e Inyección) y se procedió a generar el estudio Evaluación experimental. De acuerdo con el resultado del informe se concluye que tienen viabilidad de aplicación y podrían evaluarse en

<sup>32</sup> Base de datos OFM, Ecopetrol S.A

una etapa piloto formulaciones de las empresas SPCM S.A. (SNF Floerger-SNF INC) y NALCO DE COLOMBIA LTDA. Como estrategia de evaluación entre las dos empresas identificadas como potenciales proveedores, se establece la realización del piloto de inyección de polímero en los patrones de inyección correspondientes a los pozos YR-510 y YR-504; con la inyección independiente en cada pozo y con un proveedor diferente.

La inyección inició en el pozo YR 504 con la empresa “NALCO COLOMBIA LTDA – TIORCO” el 7 de Marzo del 2014, mientras que en el pozo YR 504 se inició el 22 de Abril de 2014 con la empresa “SNF Floerger”.

**6.2.1 Facilidades de inyección.** El piloto utilizó una planta con capacidad de mezcla e inyección de agua mejorada para 5000 barriles por día; el conjunto fue diseñado y fabricado como una unidad funcional en ciclo cerrado desde la dilución y mezcla hasta su inyección final en los pozos candidatos, lo cual elimina la posibilidad de fugas y efluentes, además de garantizar la calidad y eficiencia del proceso.

Para el desarrollo del piloto se requirió la instalación de facilidades en un área aproximada de 2000 m<sup>2</sup> en la locación Isla 7 (YR – 510 o YR – 512) e Isla 1A (YR – 504). A continuación se presenta esquemáticamente, la facilidad para agua mejorada:



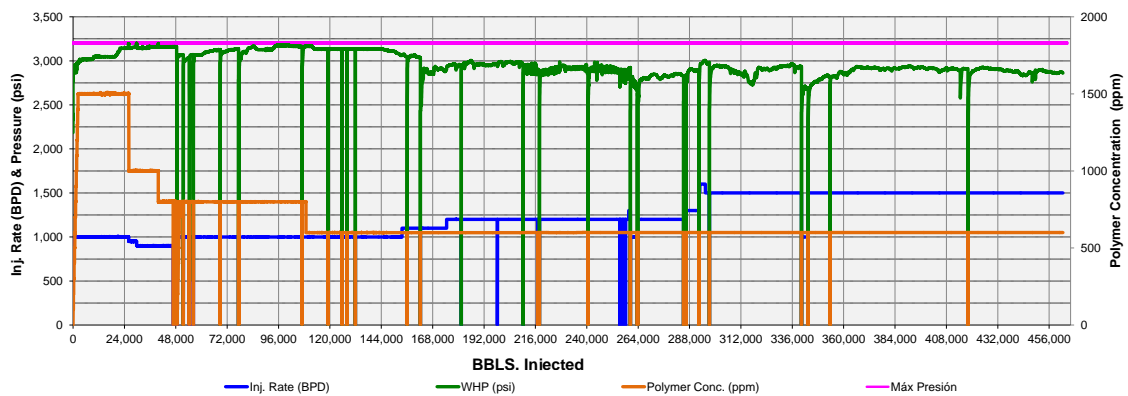
- Pruebas de producción
- Registros de producción.

A nivel de pozos inyectoros:

- Medición continua o diaria de caudal y presión de inyección.
- Registros de inyección.

Para el pozo YR-504 (Figura 47) se observa como la inyección de agua mejorada con polímeros se ha llevado de manera normal y estable. Si bien se han presentado algunos aumentos graduales en el caudal de inyección (de acuerdo al esquema de inyección inicialmente planeado), se ha tenido especial cuidado en no sobrepasar el valor máximo de presión, para tener un buen desarrollo de la inyección y garantizar los resultados deseados al finalizar el proceso.

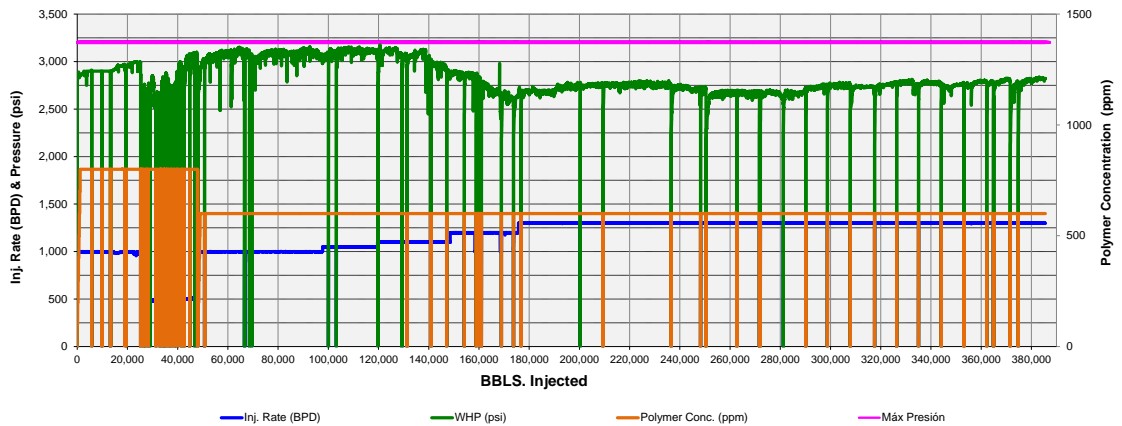
**Figura 47. Parámetros de inyección YR-504**



Fuente: Informe expansión agua mejorada Yariguí, Ecopetrol, 2016.

Por otra parte y para el pozo YR-510 (Figuras 48), se evidencia que la inyección en este pozo se efectuó inicialmente con algunas interrupciones debido a determinados sucesos operativos. Sin embargo, posterior al cambio de unidad en dicha facilidad, se observa que la inyección de agua mejorada se ha llevado sin mayores contratiempos y dentro del esquema de inyección planeado.

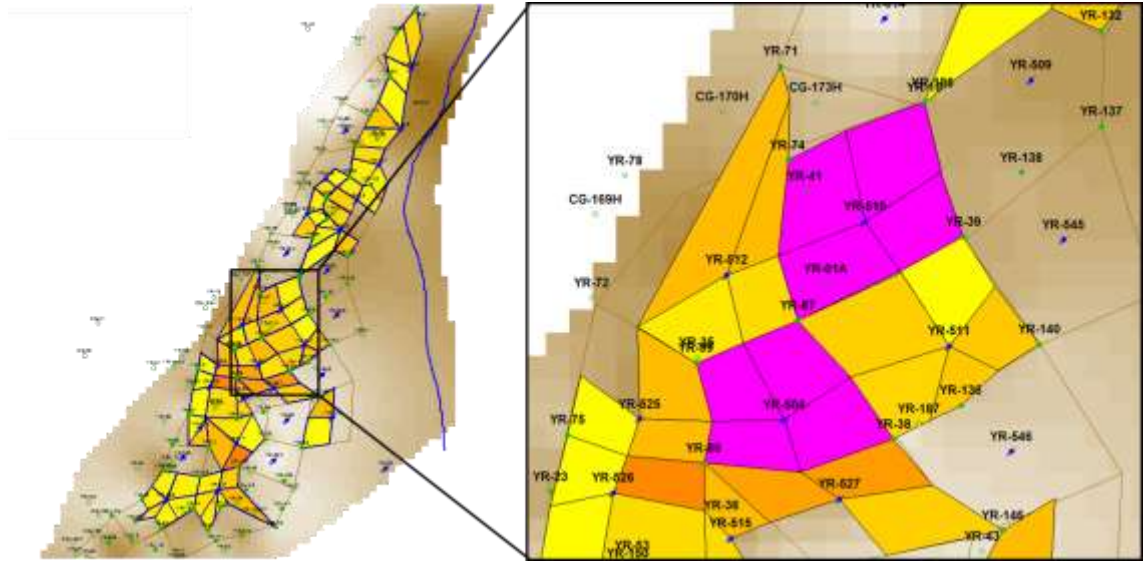
**Figura 48. Parámetros de inyección YR-510**



Fuente: Informe expansión agua mejorada Yariguí, Ecopetrol, 2016.

**6.2.3 Patrones de inyección de polímero piloto Yariguí.** La selección del área para la aplicación del proyecto piloto de inyección de polímero en campo fue soportada principalmente en el análisis geológico (p.e. correlaciones estratigráficas, mapas de propiedades petrofísicas, determinación del coeficiente de variación de permeabilidad, conectividad hidráulica entre pozos, etc.) y análisis de ingeniería (p.e. análisis del histórico de inyección/producción, registros de inyección, presión de fractura, integridad de pozos etc.). Los resultados mostraron seis patrones como las mejores opciones para aplicar esta tecnología, sin embargo, cuatro fueron descartados por confinamiento y pérdidas de inyección, además de restricciones operativas. El área seleccionada corresponde a los patrones YR-504 y YR-510.

**Figura 49. Patrones de inyección Piloto Polímero**

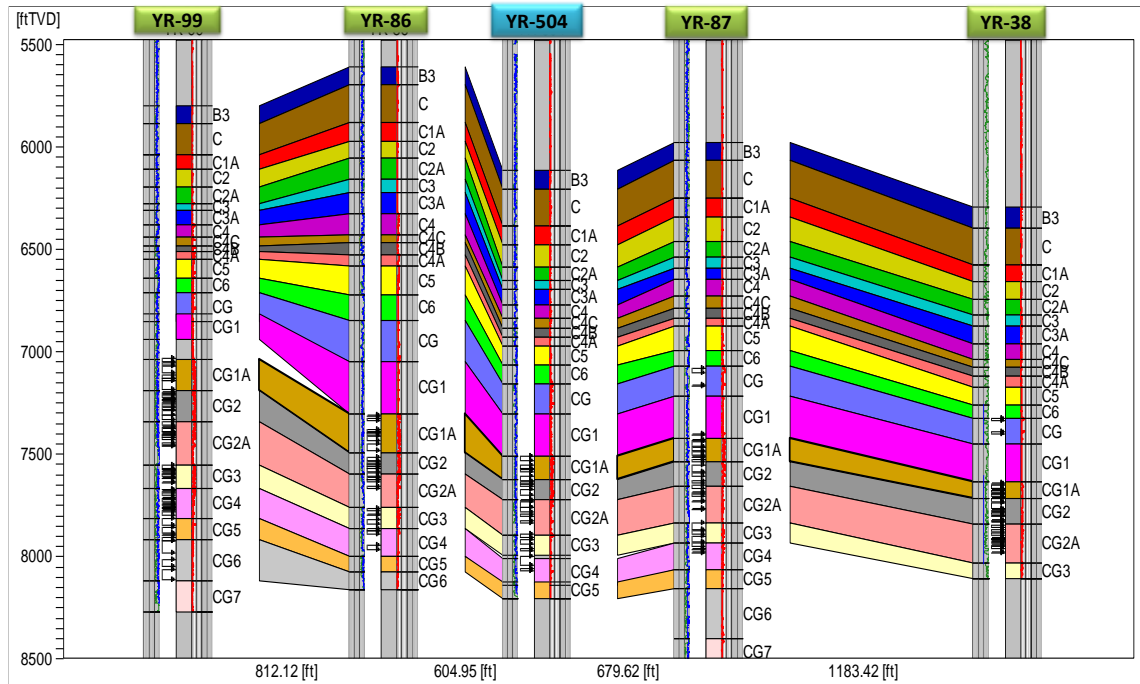


Fuente: Informe expansión agua mejorada Yariguí, Ecopetrol, 2016.

- Patrón YR-504

Este patrón contempla los pozos YR-504, YR-87, YR-38, YR-86, y YR-99 en las arenas CG2, CG2A, CG3 y CG4 de la Formación La Paz, siendo el pozo YR-504 el inyector. A continuación se muestra el patrón YR-504 y los pozos considerados a ser afectados, y el corte transversal de los mismos.

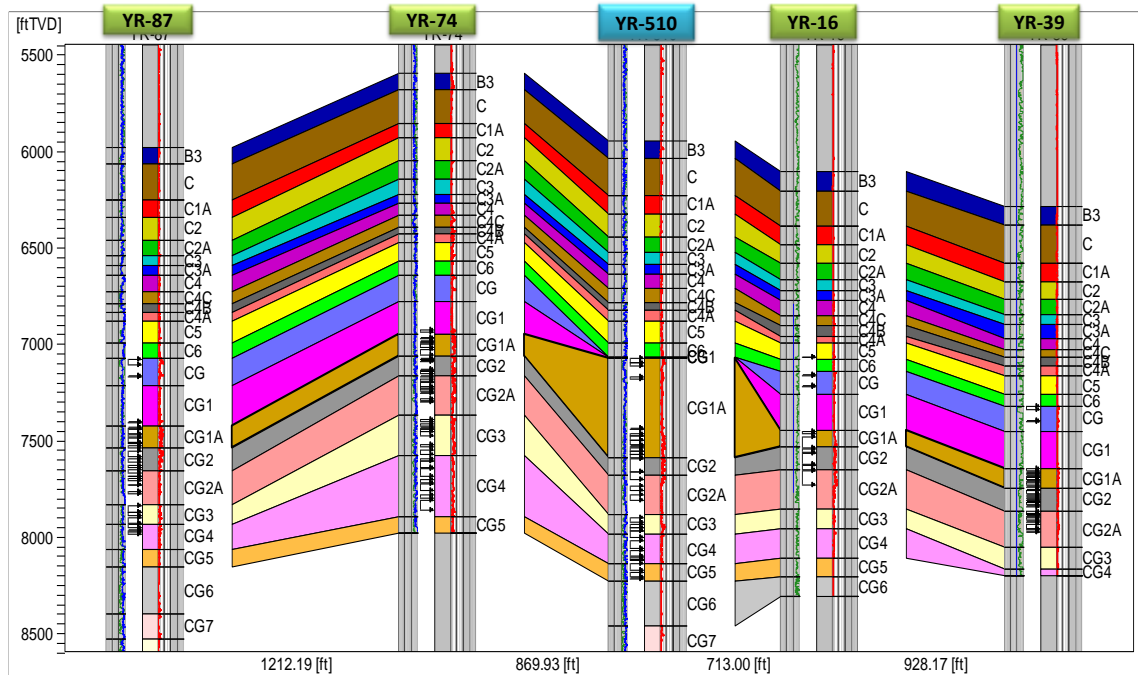
**Figura 50. Correlación estructural, Patrón YR-504**



- Patrón YR-510

Este patrón contempla los pozos YR-510, YR-16, YR-39, YR-87 y YR-74 en las arenas CG1A, CG2 y CG2A de la Formación La Paz, siendo el pozo YR-510 el pozo inyector. A continuación se muestra el patrón YR-510 y los pozos considerados a ser afectados, y el corte transversal de los mismos.

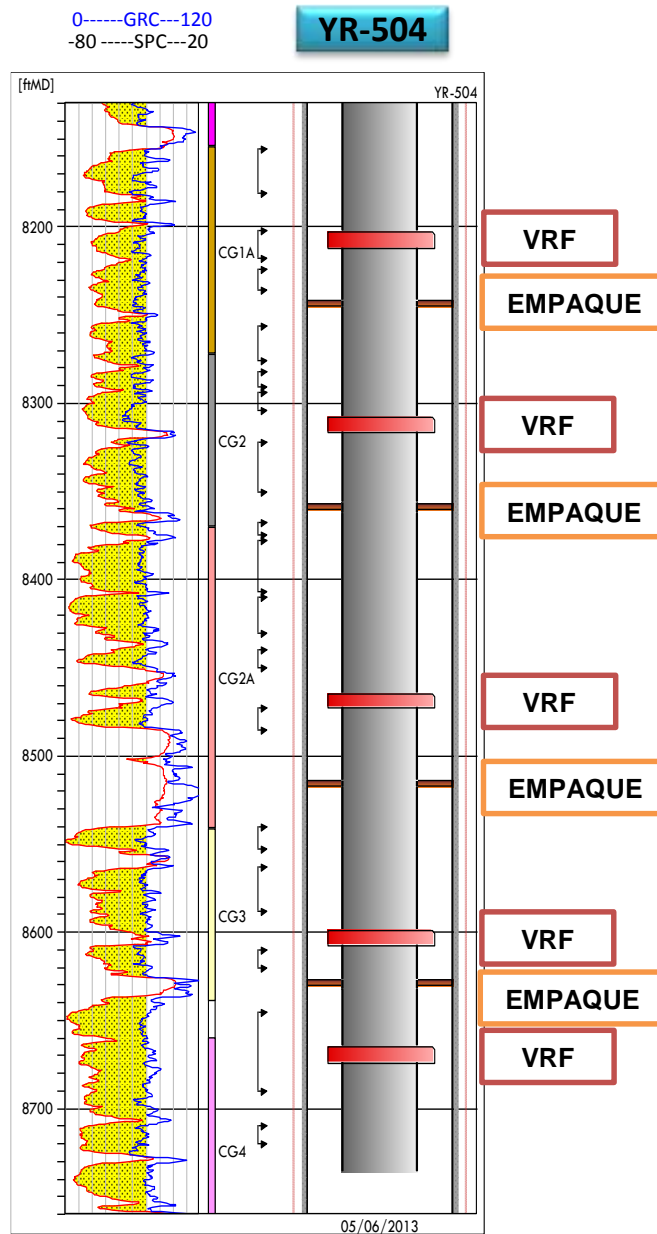
**Figura 51. Correlación estructural, Patrón YR-510**



**6.2.4 Configuración estado mecánico pozos inyectores polímero.** Con el objetivo de mejorar la eficiencia vertical de inyección en el campo Yariguí, los pozos inyectores cuentan con una sarta selectiva la cual permite controlar los volúmenes exactos de agua que se quieren inyectar a cada estrato o capa del yacimiento con una menor caída de presión (Figura 16).

El modelo de completamiento de inyección selectiva consiste de una sarta con empaques ubicados en profundidad y mandriles de bolsillo entre dichos empaques, donde las válvulas reguladoras de flujo (VRF) son ubicadas para controlar selectivamente el perfil de inyección en cada arena de manera individual, con el fin de obtener un barrido vertical más eficiente, pero para el caso del piloto de polímero se decidió usar válvulas reguladoras full open, o sea sin ningún orificio regulador interno, por el desconocimiento que se tiene sobre el efecto en la degradación mecánica del polímero que estas puedan ocasionar. En la Figura 52 y 53 se observa la configuración de la sarta de inyección selectiva, utilizada en los pozos del piloto de polímero en el Campo Yariguí.

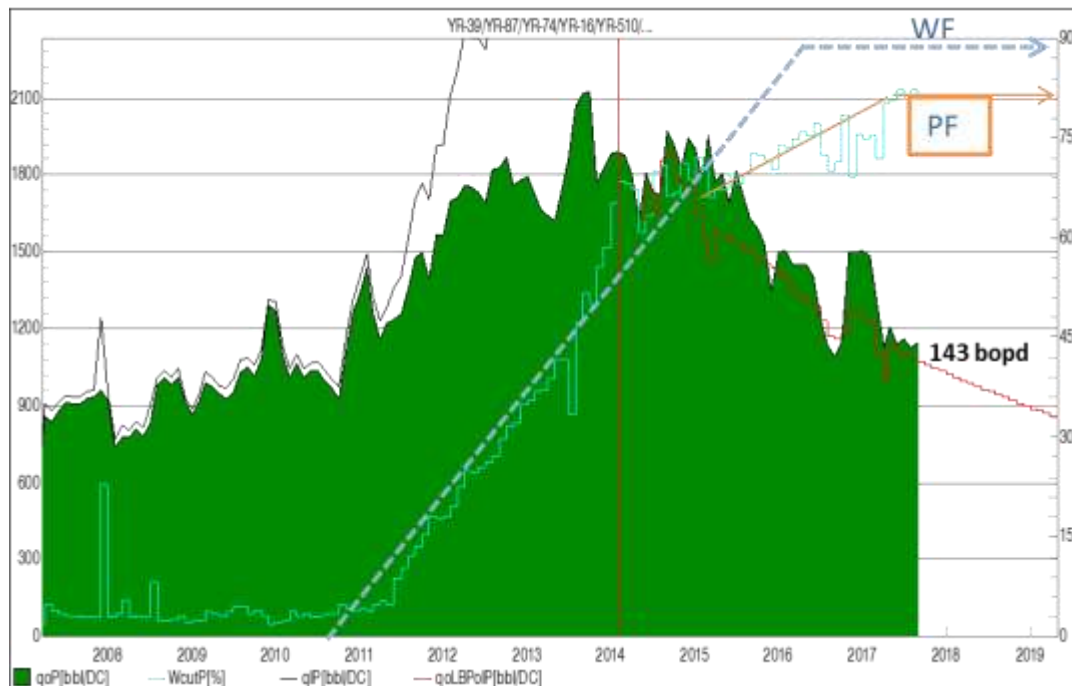
Figura 52. Estado mecánico sarta selectiva inyección, YR-504



Fuente: Informe expansión agua mejorada Yariguí, Ecopetrol, 2016.



**Figura 54. Respuesta producción piloto polímero Yariguí**

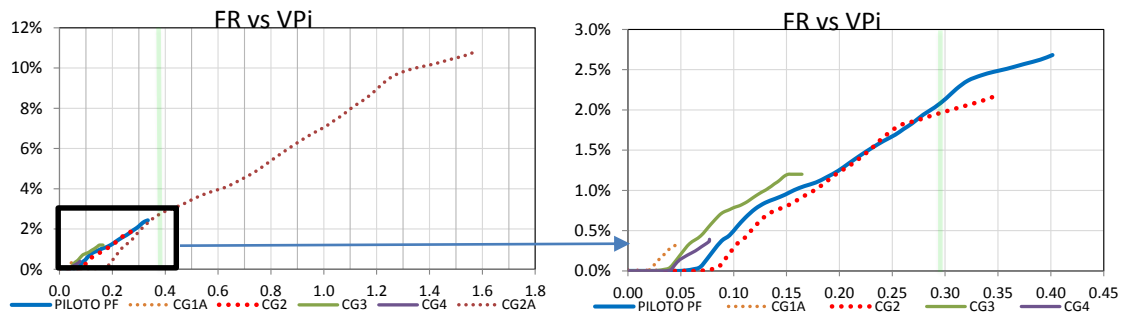


Fuente: Ficha seguimiento piloto polímero Yariguí, Ecopetrol, 2017.

Durante este periodo ha permitido reducir la incertidumbre confirmando la continuidad de las subunidades de inyección, cuantificando el impacto de la influencia del proceso sobre la producción y la presión del área, e identificando los ajustes requeridos en los parámetros de inyección y oportunidades de optimización en los procesos medición, producción e inyección. Adicionalmente ha permitido identificar la necesidad de realizar estudios y acciones de optimización antes de una posible masificación.

El volumen poroso inyectado (VPI) objetivo para el piloto era de 0.3 VPI, al realizar el análisis del balance de producción e inyección y su distribución capa a capa se evidencia una inyección preferencial sobre arenas CG2A y CG2 con un VPI superior a 0.3 en contraste con unidades que alcanzan solamente un VPI de 0.05. Lo anterior se da por no usar las válvulas reguladoras de flujo que pueden ayudar a controlar la cantidad de fluido que entra a cada arena, por lo tanto se sugiere la implementación de tecnologías de conformance que permitan mayor homogeneidad en la distribución vertical de la inyección.

**Figura 55. Factor de recobro Vs Volumen poroso inyectado piloto polímero Yariguí.**



Aunque los resultados son satisfactorios, existen aún retos e incertidumbres que se esperan cerrar con la continuidad del piloto. Entre estos interrogantes se pueden enumerar las siguientes:

- Optimización de la eficiencia vertical mediante tecnologías de conformance (químico/mecánico).
- Inyectividad de la solución polimérica en unidades CG1A y CG3.
- Evaluación de la degradación mecánica del polímero por la sarta de inyección selectiva.
- Evolución de formulación óptima para escenarios de inyección con fuente de agua de alta concentración de cloruros (mezcla de agua de captación con agua de producción).

### **6.3 ANALISIS COMPARATIVO DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA INYECCION DE POLIMERO USANDO VALVULAS REGULADORAS DE FLUJO**

Se presenta un análisis donde se comparan las dos alternativas a evaluar, la primera de ellas es usar las válvulas reguladoras sin ningún orificio de regulación interno (Full open) de flujo durante el proceso de inyección de polímero y la segunda alternativa es usar las válvulas reguladoras de flujo durante la inyección de polímeros.

Para realizar esta comparación detallando las ventajas y desventajas en cada una de las dos alternativas se utilizan los resultados del piloto efectuado en el campo Yariguí en donde las válvulas reguladoras de flujo que se usaron no contaban con el cuerpo dinámico interno de regulación por el desconocimiento que se tenía sobre el porcentaje de degradación mecánica que estas podrían ocasionar a la viscosidad de la solución polimérica que se estaba inyectando en el piloto; y los resultados obtenidos en las pruebas experimentales usando las válvulas reguladoras con diferentes configuraciones de orificios donde se pudo evaluar el efecto en la degradación de la viscosidad del polímero ocasionado por su paso a través de estas.

La comparación de ventajas y desventajas se presenta en las tablas 5 y 6.

**Tabla 5 Analisis ventajas y desventajas inyeccion de polimero sin regulacion de flujo.**

INYECCIÓN DE POLÍMERO SIN REGULACION DE FLUJO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
No se requieren intervenciones a pozo con unidad de slickline para realizar cambios o mantenimiento en las válvulas reguladoras de flujo.	No es posible regular el caudal de polímero que ingresa a cada arena o capa del yacimiento.
La solución polimérica con una concentración de 300 ppm en desplazamientos a través de la VRF sin orificio "Full Open" presenta solo un 4 % de pérdida de viscosidad.	En el piloto del campo Yariguí la arena CG1A solamente admitió 0.05 VPI de solución polimérica, estando muy por debajo de los 0.3 VPI objetivo.
La solución polimérica con una concentración de 500 ppm en desplazamientos a través de la VRF sin orificio "Full Open" presenta un 10 % de pérdida de viscosidad.	En la arena CG3 se inyectaron 0.16 VPI de solución polimérica, estando muy por debajo de los 0.3 VPI objetivo.

La solución polimérica con una concentración de 800 ppm en desplazamientos a través de la VRF sin orificio "Full Open" presenta un 9 % de pérdida de viscosidad.	En la arena CG4 se inyectaron 0.08 VPI de solución polimérica, estando muy por debajo de los 0.3 VPI objetivo.
Al no tener restricción de caudal de inyección se alcanzó en el piloto los 0.4 VPI cumpliendo con el objetivo de inyectar 0.3 VPI.	Para la arena CG2A se inyectó alrededor de 1.6 VPI sobrepasando considerablemente los 0.3 VPI objetivo y convirtiéndose en la zona de mayor inyectividad preferencial.
	Al no tener restricción de caudal de inyección se alcanzó en el piloto los 0.4 VPI (0.3 VPI objetivo), pero al analizar capa a capa se evidenció que por la no regulación solamente la arena CG2A se llevó la mayor parte de polímero inyectado, dejando otras arenas sin posibilidad de recibir más volumen de polímero lo cual se traduce en menor recobro.
	El piloto de inyección de polímero en el campo Yariguí presenta una baja eficiencia vertical de inyección.

**Tabla 6 Analisis ventajas y desventajas inyeccion de polimero con regulaci3n de flujo.**

INYECCI3N DE POL3MERO CON REGULACION DE FLUJO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Permite regular el caudal de pol3mero que ingresa a cada arena o capa del yacimiento usando las v3lvulas	Se requieren intervenciones a pozo con unidad de slickline para realizar cambios o mantenimiento en las

reguladoras de flujo.	válvulas reguladoras de flujo.
La solución polimérica de 300 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificios de 6, 7 y 9 mm presentan una pérdida de viscosidad entre el 9 y 14 % por lo cual se podrían usar estos orificios a esa concentración para regular caudal en cada arena.	La solución polimérica de 300 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificio de 5 mm muestra una pérdida de viscosidad de 17% y para orificios de 2 y 3.75 mm la pérdida de viscosidad está entre el 23 y 26 % por lo cual estos orificios a esa concentración no se recomendarían para regular caudal en cada arena.
La solución polimérica de 500 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificios mayores a 5 mm (5, 6, 7 y 9 mm) presentan una pérdida de viscosidad promedio del 11% por lo cual se podrían usar estos orificios a esa concentración para regular caudal en cada arena.	Los orificios de 2 y 3.75 mm evaluados a una concentración de polímero de 500 ppm presentan pérdidas de viscosidad entre el 20 y 24% por lo cual no se recomienda su utilización para regular caudal.
Los orificios de 2, 3.75, 5, 6, 7 y 9 mm evaluados a una concentración de polímero de 800 ppm presentan pérdidas de viscosidad menores al 10% por lo que se recomienda su utilización para regular caudal.	La solución polimérica de 800 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificio de 2 mm muestra una pérdida de viscosidad de 20% por lo cual este orificio a esa concentración no se recomendaría para regular caudal.
Al aumentar la concentración de polímero las pérdidas de viscosidad disminuyen en la mayoría de orificios evaluados, por lo cual se podría recomendar como una opción para	

mejorar el rango de orificios que se pueden usar para regular caudal.	
El piloto de inyección de polímero en el campo Yariguí podría mejorar su eficiencia vertical de inyección si se usan VRF adecuadas para cada capa del yacimiento.	

## 7 CONCLUSIONES

- El montaje del banco de prueba experimental diseñado mantiene el principio de medición de la norma API RP63 aun cuando se realizan ajustes para acoplar dentro del sistema la válvula reguladora de flujo la cual reemplaza al capilar.
- Se puede apreciar de forma general un adecuado ajuste de los datos de viscosidad originales y duplicados, en los casos donde se aprecia una desviación, esta no supera el 2% de diferencia.
- La viscosidad del polímero aumenta en función de la concentración del polímero, a mayores concentraciones se obtienen los valores más altos de viscosidad.
- El porcentaje de degradación de polímero en función de la tasa de corte, muestra que a mayor tasa de corte se incrementa el porcentaje de degradación de la solución polimérica y estas altas tasas de corte se presentan en los desplazamientos con orificios VRF de menor diámetro.
- A medida que disminuyen los diámetros de los orificios de la válvulas reguladoras de flujo se aumenta el porcentaje de degradación del polímero en las concentraciones evaluadas de 300, 500 y 800 ppm.
- El porcentaje de degradación del polímero es menor cuando la concentración del polímero aumenta, por lo cual a concentraciones de 500 y 800 ppm para orificios menores a 7 mm se obtienen porcentajes de degradación más bajos que los obtenidos a una concentración de 300 ppm.
- La solución polimérica de 300 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificios de 6, 7 y 9 mm presentan una pérdida de viscosidad entre el 9 y 14 %, en desplazamientos con orificio de 5 mm muestra una pérdida de viscosidad de 17% y para orificios de 2 y 3.75 mm la pérdida de viscosidad esta entre el 23 y 26 %. La solución polimérica en desplazamientos a través de la VRF sin orificio "Full Open" presenta solo un 4 % de pérdida de viscosidad.
- Para una concentración de polímero de 500 ppm en desplazamientos a través de la VRF con orificios mayores a 5 mm (5, 6, 7 y 9 mm) presentan una pérdida de viscosidad promedio del 11%. Los orificios de 2 y 3.75 mm evaluados a una concentración de polímero de 500 ppm presentan pérdidas de viscosidad entre el 20 y 24%, y en

desplazamientos a través de la VRF sin orificio “Full Open” presenta un 10 % de pérdida de viscosidad.

- Los orificios de 3.75, 5, 6, 7, 9 mm y FO evaluados a una concentración de polímero de 800 ppm presentan pérdidas de viscosidad menores al 10%. En desplazamientos a través de la VRF con orificio de 2 mm muestra una pérdida de viscosidad de 20%.
- Los modelos matemáticos para encontrar el porcentaje de degradación de la viscosidad del polímero para una concentración de 300, 500 y 800 ppm a diferentes configuraciones del cuerpo dinámico (orificios de regulación de la válvula reguladora de flujo) siguen la tendencia lógica de los datos experimentales y presentan coeficientes de correlación de 0.9303, 0.924 y 0.9958 respectivamente.
- El piloto de inyección de polímero en el campo Yariguí puede mejorar su eficiencia vertical de inyección si se usan VRF adecuadas para cada capa del yacimiento.

## 8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar otro tipo de válvulas reguladoras de flujo de otras compañías para cuantificar el porcentaje de degradación del polímero usando el protocolo y el banco de prueba experimental construido.
- Utilizando el banco de prueba experimental, evaluar otros tipos de polímero para buscar menores porcentajes de degradación en los orificios evaluados de la válvula reguladora de flujo.
- Al aumentar la concentración de polímero las pérdidas de viscosidad disminuyen en la mayoría de orificios evaluados, por lo cual se podría recomendar como una opción para mejorar el rango de orificios que se pueden usar para regular caudal.
- Para el piloto del campo Yariguí se recomienda regular al mínimo el caudal de polímero en la arena CG2 y CG2A por presentar los volúmenes porosos inyectados más altos y haber alcanzado el objetivo de 0.3 VPI.
- Para las arenas CG1A, CG3 y CG4 se recomienda no regular el caudal de polímero dado los bajos volúmenes porosos inyectados durante el piloto. Se espera que estas arenas mejoren su inyectividad una vez sean regulados los caudales de las arenas CG2 y CG2A.
- Se recomienda usar orificios de regulación en la VRF que no superen el 20% de degradación de la solución polimérica.
- Se recomienda realizar una simulación CFD y validarla con los resultados experimentales de laboratorio obtenidos en este trabajo.
- Realizar una evaluación del efecto de degradación del polímero en el medio poroso usando como datos de entrada la información que se obtuvo en el desarrollo experimental de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

AL HASHMI, A. R., AL MAAMARI, R. S., AL SHABIBI, I. S., MANSOOR, A. M., ZAITOUN, A., & AL SHARJI, H. H. (2013). Rheology and mechanical degradation of high-molecular-weight partially hydrolyzed polyacrylamide during flow through capillaries. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 105, 100-106.

API, R. (63). Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in enhanced oil recovery operations. June, 1, 1990.

CHANG, H.L. Polymer flooding technology –Yesterday, Today, and Tomorrow. August, 1978. p.1113.

GUALTEROS QUIROGA, Milton Julián y ARIZA APARICIO, Oscar Iván. Implementación de una metodología para el análisis sistemático de fallas en las válvulas reguladoras de flujo utilizadas en el sistema de inyección de agua con sarta selectiva en campo Casabe. Bucaramanga, 2016, 124p. Trabajo de grado (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Químicas.

GUERRERO PABON, Cindy Mildred. Evaluación de un proceso de inyección de surfactante-polímero a partir del dimensionamiento de sus concentraciones y volúmenes de bache. Bucaramanga, 2015, 242p. Trabajo de investigación (Magíster en ingeniería de hidrocarburos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Químicas.

INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO. Evaluación experimental de polímeros para recobro mejorado en el campo Yariguí. Piedecuesta. ICP, 2013.

JEANES, A., PITTSLEY, J. E., and SENTI, F.R.: "Polysaccharide B-1459: A new hydrocolloid polyelectrolyte produced from glucose by bacterial fermentation," J. App. Polymer Sci. 1961

JIMENEZ MOLANO, Ana María. Metodología para el diseño de baches en un proceso de inyección de polímeros a partir de fenómenos de interacción roca / fluidos presentes. Bucaramanga, 2015, 236p. Trabajo de investigación (Magíster en ingeniería de hidrocarburos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico - Químicas.

MAERKER, J.M., Shear degradation of partially hydrolyzed polyacrylamide solutions. SPE J., 15(4). 1975

MANRIQUE CÁRDENAS, Jorge Luis. Manual operativo de mantenimiento de Válvulas Reguladoras de Flujo, ECOPETROL S.A.

MAYA, G., JIMENEZ, R., CASTRO, R., MANTILLA, J., VARGAS, J., CARDENAS, F. & ROMERO, J. (2015, November). Design and implementation of the first polymer flooding project in Colombia: Yariguí-Cantagallo Field. In SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers.

MONTGOMERY D. "Diseño y Análisis de Experimentos", 2da Ed. Universidad Estatal de Arizona, Limusa Wiley, 2004.

PULPS, Christoph. Mechanical Degradation of Polymers During Injection, Reservoir Propagation and Production - Field Test Results 8 TH Reservoir, Austria. SPE 180144. En: SPE Europec featured at 78th EAGE Conference and Exhibition, Vienna, Austria 30 May-2 June 2016

SORBIE, K & PHIL, D. Polymer-improved oil recovery. Published in the USA and Canada by CRC Press, Florida. 1991.

STRIGHT, J. The use of polymers for enhanced oil recovery a Review. Petroleum recovery institute. 2008.

SHENG, James. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery. Theory and Practice. ELSEVIER. 2011. p.101.

VERMOLEN, C, et Al. (2011). Pushing the envelope for polymer flooding towards high-temperature and high-salinity reservoirs with polyacrylamide based ter-polymers. SPE

WILLHITE, G.P., GREEN, D.W. Enhanced Oil Recovery. SPE Textbook Series, 6. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, 1998.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### **Determinación del porcentaje de humedad en muestras solidas de HPAM**

Se debe realizar este procedimiento para cuantificar el porcentaje de humedad presente en la muestra solida de polímero y con esta información calcular de manera más acertada la cantidad de polímero requerido en la preparación de la solución madre.

#### **Procedimiento**

- Pesar un vidrio reloj. Se debe asegurar que esté limpio y completamente seco.
- Pesar 1,5 gr de polímero sólido.
- Calentar la muestra en el horno por 1 hora, a una temperatura entre 100-105 °C.
- Llevar inmediatamente a un desecador, y dejar la muestra 1 hora en el mismo.
- Pesar nuevamente la muestra de polímero deshidratada y registrar el peso final.
- Calcular el porcentaje de humedad de acuerdo a la Ecuación 11.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{1.5-1.35}{1.5} * 100 = 10\%$$

#### **Preparación de solución madre**

Para asegurar que la preparación la solución madre sea correcta, se debe conocer el porcentaje de humedad del polímero.

## Procedimiento

- Calcular la cantidad necesaria para preparar la solución polimérica a la concentración deseada. Este cálculo se puede realizar utilizando la Ecuación 12.

$$X_{polimero} (g) = \frac{6000 * 0.75}{1000 * (1 - 0.1)} = 5 \text{ gr}$$



- Calcular el peso requerido de agua o salmuera de preparación. Este valor se halla restando al peso total y el peso de polímero hallado, como lo indica la Ecuación 13.

$$Y(g) = (750 * 1) - 5 = 745 \text{ gr}$$



### Preparación de soluciones diluidas

- Pesar en un beaker la cantidad de solución madre necesaria para preparar la solución a la concentración requerida. La solución madre debe ser tomada del recipiente que la contiene con una jeringa sin punta, para así evitar someterla a esfuerzos de corte muy altos que puedan degradarla mecánicamente.

El cálculo de la cantidad de solución madre necesaria para preparar la solución diluida se puede realizar utilizando la Ecuación 14.

$$V_i = \frac{900 * 300}{6000} = 45 \text{ gr Sln madre para concentración de 300 ppm}$$

$$V_i = \frac{900 * 500}{6000} = 75 \text{ gr Sln madre para concentración de 500 ppm}$$

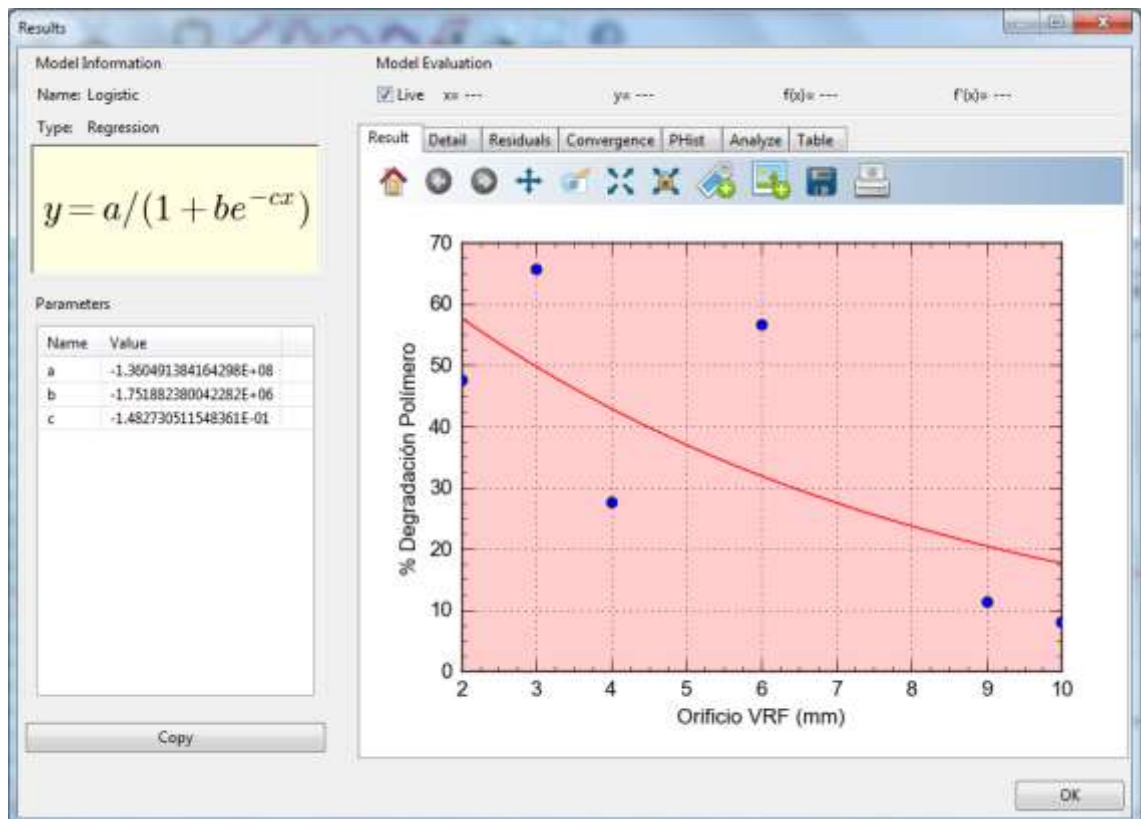
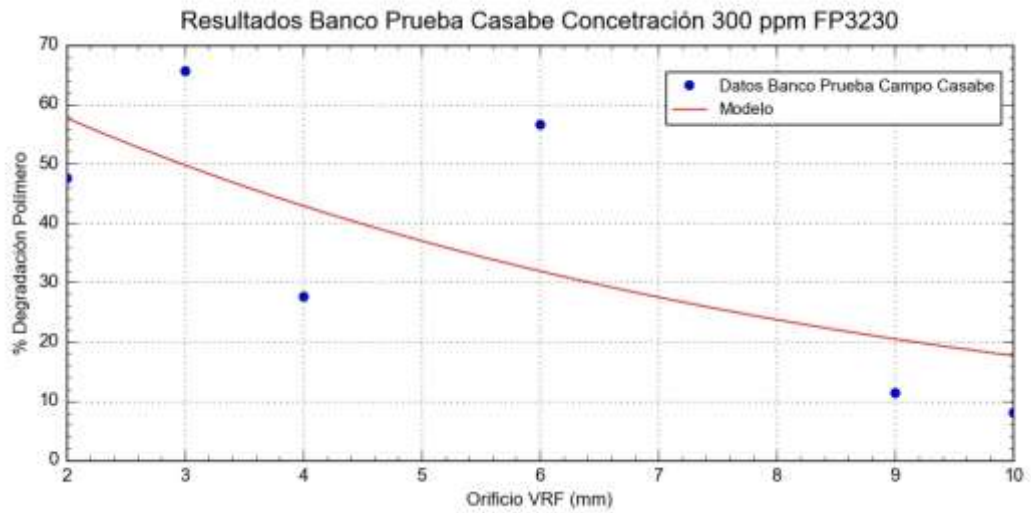
$$V_i = \frac{900 * 800}{6000} = 120 \text{ gr Sln madre para concentración de 800 ppm}$$



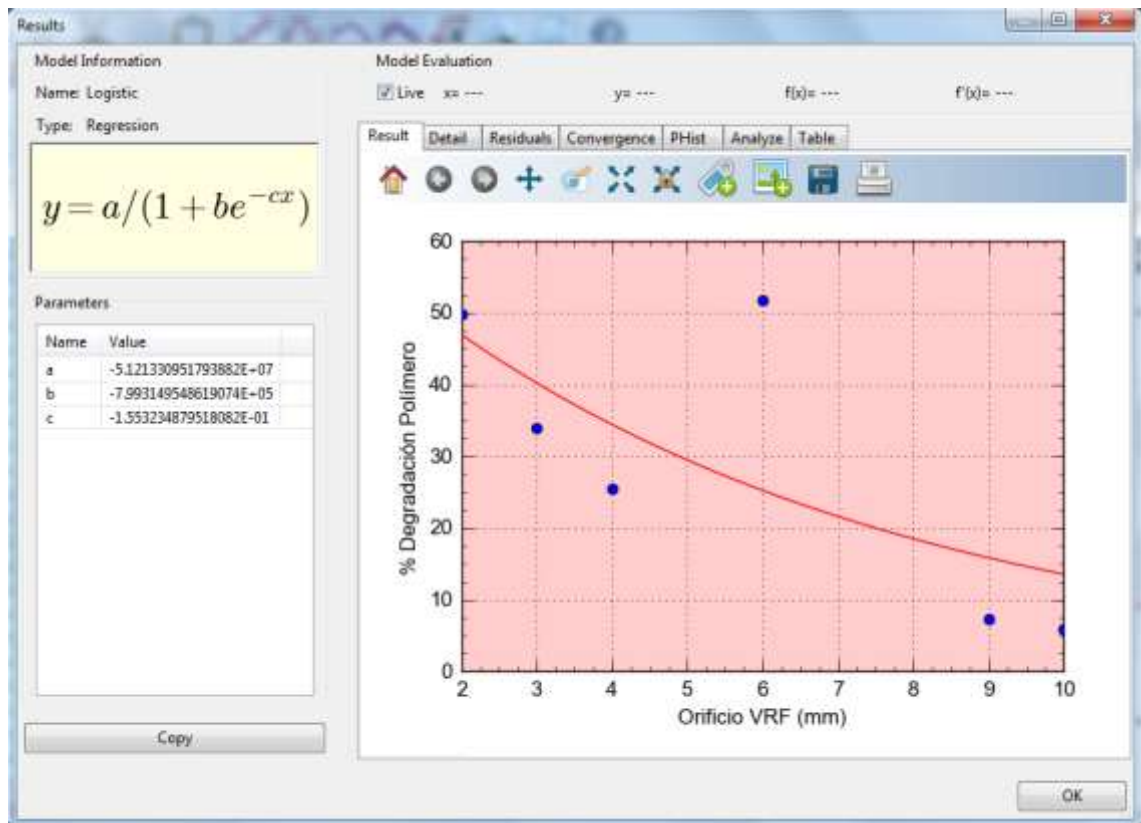
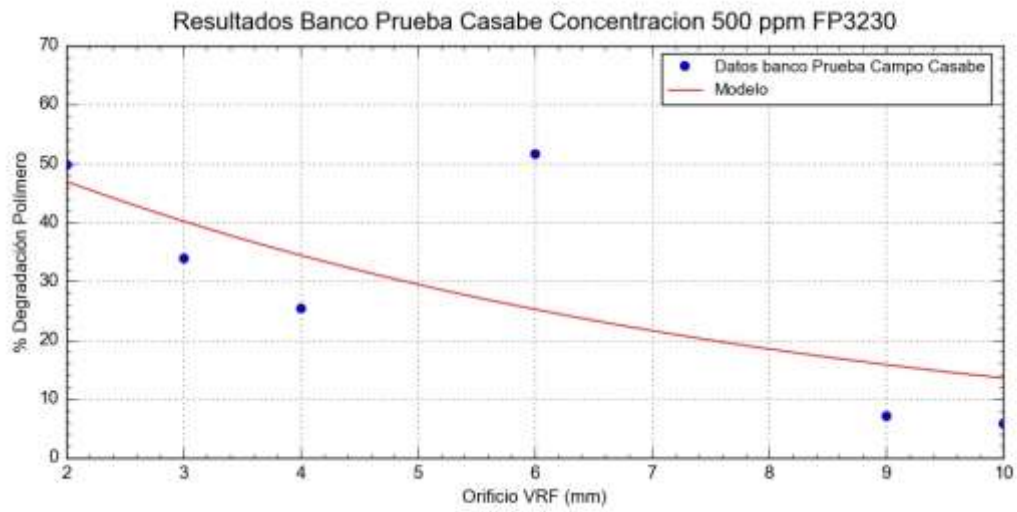
## ANEXO B

### Resultados Degradación Polímero VRF Banco Prueba Campo Casabe

#### Concentración 300 ppm Polímero FP3230



## Concentración 500 ppm Polímero FP3230



## Concentración 1000 ppm Polímero FP3230

