

Análisis de Resultados de Pruebas Experimentales a Escala Laboratorio para la Optimización del
Proceso de Selección de Polímeros como Método de Recobro Mejorado

Martha Lidiana Chaparro Zipagauta, Rosur Joel Nariño Prada

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero de petróleos

Director

Hugo Alejandro García Duarte

Magister en ingeniería Química y de petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A **Dios** por darme fortaleza y sabiduría en los momentos que sentí decaer, por guiarme día a día con la convicción necesaria para cumplir cada meta

A mi **Madre** Edelmira Zipagauta por darme alas para volar, por apoyarme siempre en cada paso, por darme animo en cada derrota, por hacer de mí una mujer con principios y fuerte, por arriesgarse, sobre todo por su confianza, por las noches que pasamos en vela y las que me acompañó a llorar, por las lágrimas que limpiamos mutuamente, por enseñarme a tener fé, porque soy gracias a ella. Todos mis logros serán dedicados siempre a ti mi morena.

A mi **Abuelita** María de Jesús Rincón por ser mi guía espiritual, por enseñarme a creer en Dios, porque sus oraciones siempre han estado conmigo, por su fortaleza y ejemplo de amor incondicional.

A mi **Hermanito** Fernando Chaparro que desde su llegada ha sido gran parte de mi motivación, por convertirse en mi cómplice y amigo.

A **Manuel Trujillo** por llegar a ser parte de mi camino, por tenerme paciencia y confiar en mí, por las veces que me vio vencida y me dio la mano, por no dejarme sola y por su apoyo incondicional, por su amor y por convertirse en un compañero y cómplice.

Martha Lidiana Chaparro Zipagauta

A **Dios** por darme salud, fortaleza y sabiduría e iluminarme en todo momento.

A mi **padre** José Álvaro Nariño Antolínez (Q.E.P.D) por la educación recibida durante 23 hermosos años, por la compañía y el apoyo que me brindó.

A mi **madre** Himelda Prada Serrano por la entrega, por la paciencia, por llenarme de amor en momentos difíciles, por sus sacrificios, por sus consejos y por ser mi mayor motivación en este largo camino que es la vida.

A mi **hermana** Justy Nariño Prada por ser ese modelo a seguir, por convertirse en mi confidente y guía, por darme aliento cuando creía que no podía y llenarme de convicción para poder terminar este proceso.

A mis **amigos** de universidad y de infancia, por impulsarme a mejorar cada día, y por tantos buenos momentos vividos.

Rosur Joel Nariño Prada

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a:

A la **Universidad industrial de Santander**, por brindarnos la oportunidad de ser parte de ella, a cada uno de los docentes que nos guiaron por este camino de aprendizaje por formarnos como buenas personas y profesionales.

A la **Escuela de Ingeniería de petróleos**, por su acompañamiento constante a lo largo de nuestra formación profesional.

A nuestro director de proyecto M.sc Hugo Alejandro García Duarte, por su paciencia, apoyo, guía y confianza en cada aspecto de este trabajo.

A la ingeniera Lia Cohen por su comprensión, apoyo y todas las herramientas que necesitamos para la elaboración de este proyecto.

Agradecemos al **instituto colombiano del petróleo** y a **ECOPETROL**, por brindarnos el privilegio de desarrollar este trabajo con ustedes.

Contenido

	Pág.
Introducción	18
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo General	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Marco de Referencia	21
2.1 Generalidades de la inyección de polímeros.....	21
2.1.1 Descripción del proceso.....	22
2.2 Parámetros significativos de los polímeros.....	23
2.2.1 Composición.	23
2.2.1.1 Poliacrilamida.	24
2.2.2 Peso molecular promedio.....	28
2.2.3 Hidrólisis.....	29
3. Factores que afectan la integridad del polímero con relación al desempeño del polymer flooding en procesos piloto en campo.	32
3.1 Tipos de degradación	32
3.1.1 Degradación mecánica.	32

3.1.2 Degradación química.	33
3.1.2.1 Degradación oxidativa.	33
3.1.3 Degradación Térmica.	33
3.2 Propiedades fundamentales de la roca y los fluidos que afectan la inyección de polímeros..	35
3.2.1 Salinidad del agua de formación y cationes divalentes.	36
3.2.2 Temperatura del yacimiento.	36
3.2.3 Permeabilidad de la formación.	37
3.2.4 Oxígeno/ Hierro.	37
 4. Ensayos realizados para la evaluación y selección de polímeros para considerar la aplicación en campo.....	 40
4.1 Caracterización básica de los polímeros.	40
4.1.1 Espectro infrarrojo	41
4.1.2 Determinación del porcentaje de humedad.	42
4.1.3 Determinación del porcentaje de hidrólisis en poliacrilamidas	43
4.1.4 Comportamiento reológico de las soluciones poliméricas.....	44
4.1.5 Curvas de viscosidad VS concentración.	47
4.1.6 Screen factor (SF).	48
4.1.7 Curvas reológicas.....	49
4.1.8 Ensayos de filtrabilidad.....	51
4.1.8.1 Radio de filtrabilidad.	51
4.1.8.2 Filtrabilidad acumulada.	53
4.1.9 Degradación mecánica.	54

4.2 Análisis de resultados para el campo C.	56
4.2.1 Análisis ensayo de reología.	57
4.2.2 Análisis ensayo de filtrabilidad.....	58
4.2.3 Análisis ensayo de degradación mecánica.	59
4.2.4 Polímeros que prometen mayor aplicación.....	59
4.3 Polímeros que prometen mayor aplicación.....	60
5. Desarrollo de la macro	60
5.1 Ventana de menú principal	62
5.1.1 Agregar nuevo campo.....	63
5.1.2 Listado de campos.....	70
5.1.3 Consultar nuevo campo.....	71
5.1.4 Propiedades de los campos	72
5.1.5 Polímeros.	73
5.1.6 Descripción de la macro.....	73
5.2 Codificación de Componentes	74
5.2.1 Codificación botón Agregar nuevo campo	74
5.2.2 Codificación botón insertar.....	74
5.2.3 Codificación botón salir.....	79
5.2.4 Codificación botón polímeros.....	80
5.2.5 Codificación botón propiedades de los campos.....	80
5.2.6 Codificación botón consultar nuevo campo.....	80
5.2.7 Codificación boton consultar	80

5.2.8 Codificación botón Generar hojas para las pruebas.....	93
5.2.9 Codificación botón agregar concentración	107
5.2.10 Codificación botón ver grafica comparativa.....	108
6. Conclusiones	108
7. Recomendaciones	109
Referencias Bibliográficas	110

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de inyección de polímeros	22
Figura 2. Tipos de polímeros	24
Figura 3. Representación de un polielectrolito.	26
Figura 4. Representación de un polímero asociativo.	26
Figura 5. Representación de una cadena polimérica con sustituyentes laterales.	34
Figura 6. Degradación térmica.	35
Figura 7. Efecto del Fe^{+3} sobre la viscosidad de la HPAM.	38
Figura 8. Efecto del Fe^{+2} sobre la viscosidad de la HPAM.	38
Figura 9. Esquema del espectro infrarrojo por transformada de Fourier con sistema microscopio.	42
Figura 10. Esquema de comportamientos de los fluidos no newtonianos	46
Figura 10. Representación esquemática del aparato para la medición de Screen Factor.	49
Figura 11. Representación esquemática de aparato para la medición de la relación de filtrabilidad.	52
Figura 12. Representación esquemática de aparato para degradación mecánica.	54
Figura 13. Campo C.	56
Figura 14. Ventana de menú principal	62
Figura 15. Ventana de menú principal, selección del proceso de agregar nuevo campo	63
Figura 16. Formulario de registro de nuevo campo; selección de cantidad de polímeros	64

Figura 17. Formulario de registro nuevo campo; selección del botón insertar.....	64
Figura 18. Ventana principal del nuevo campo registrado	65
Figura 19. Ventana principal de nuevo campo registrado; se inscriben datos de compañías y polímeros a estudiar	66
Figura 20. Ventana de registro de resultados de prueba de viscosidad	66
Figura 21. Ventana de registro de resultados de prueba de viscosidad con los valores de los resultados obtenidos insertados.....	67
Figura 22. Selección del botón “ver gráfico comparativo”	68
Figura 23. Gráfica comparativa entre 3 de los polímeros en estudio.....	68
Figura 24. Selección del resultado final de la prueba.	69
Figura 25. Tabla de resultados de la caracterización básica de polímeros en laboratorio.	69
Figura 26. Lista de campos registrados.....	70
Figura 27. Ventana de menú principal, selección del botón consultar nuevo campo	71
Figura 28. Formulario de consulta de nuevo campo.....	71
Figura 29. Consulta de propiedades de campos que se encuentran dentro de rangos establecidos.	72
Figura 26. Tabla de propiedades de los campos.	72
Figura 26. Lista de propiedades básicas de los polímeros.	73

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Efecto del tamaño de la molécula sobre su estado de agregación.	29
Tabla 2. Jerarquización de parámetros en base a la dificultad técnica de la inyección de polímeros.	39
Tabla 3. Rangos de dificultad técnica que enfrentan los polímeros durante la inyección	55
Tabla 4. Propiedades de la roca y los fluidos campo C.	57
Tabla 5. Polímeros que fallaron en el ensayo de Reología	57
Tabla 6. Polímeros que fallaron en el ensayo de filtrabilidad.....	58
Tabla 7. Polímeros que fallaron en el ensayo de degradación mecánica.	59
Tabla 8. Polímeros que según los ensayos prometen mayor aplicación	59

Nomenclatura usada en el desarrollo del trabajo de grado

PAM: Poliacrilamida

HPAM: Poliacrilamida parcialmente hidrolizada

ppm: partes por millón

OOIP: Petróleo original en sitio

°C: Grados Celsius

°F: grados Fahrenheit

ATBS: acrilamida tributil sulfonado de sodio

mD: Milidarcy (Unidad de permeabilidad)

IR: Espectro infrarrojo

g: gramos

min: minutos

μ : viscosidad

η : viscosidad aparente

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

cP: Centipoise (unidad de viscosidad)

SF: Screen factor

μm : Micrometros

m: metros

τ : Esfuerzo de corte

Psi: libras por pulgada cuadrada (unidad de presión)

ml: mililitro (unidad de volumen)

cc: centímetros cúbicos (unidad de volumen)

sr: velocidad de corte

Q: caudal

cm³: centímetros cúbicos

S: segundos

Ca²⁺: ion calcio

Mg²⁺: ion magnesio

Fe²⁺: ion hierro

O: Oxígeno

TDS: total dissolved solids (sólidos totales disueltos)

Da: Dalton

Fe³⁺: Ion férrico

Resumen

Título: Análisis de Resultados de Pruebas Experimentales a Escala Laboratorio para la Optimización del Proceso de Selección de Polímeros como Método de Recobro Mejorado*

Autores: Martha Lidiana Chaparro Zipagauta, Rosur Joel Nariño Prada**

Palabras Clave: inyección de polímeros, dificultad técnica, eficiencia de la solución polimérica, sistematización de datos.

Descripción:

En las estrategias para el incremento del factor de recobro se encuentra la implementación de recobro mejorado químico, mediante inyección de polímeros cuya función es incrementar la viscosidad del fluido desplazante. Inicialmente, evaluando la factibilidad técnica y económica mediante ensayos en laboratorio y a través de la ejecución de pilotos. La eficiencia de la solución polimérica se ve afectada por diferentes factores que involucran desde las propiedades de la roca hasta la composición del agua de preparación. Determinar la eficiencia que tendrá la solución polimérica es clave para lograr una inyección exitosa, para esto es necesario conocer la composición de los diferentes polímeros y la afectación que tendrán al enfrentarse a diferentes propiedades de la roca y los fluidos del yacimiento, para prever el desempeño que tendrá una solución polimérica es necesario establecer una metodología de análisis que permita revisar todos los ensayos que se han realizado en laboratorio y los resultados obtenidos de los pilotos, y de esta manera lograr mejorar el proceso de selección de polímeros comerciales para futuras inteligencias, con este trabajo de grado se busca lograr la reducción de gastos y costos al momento de realizar una inteligencia de mercado para nuevas inyecciones, descartando los polímeros que por sus propiedades y composición no tendrán buenos resultados frente a las propiedades del yacimiento a las que se enfrentan.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Hugo Alejandro García duarte, Magister en Ingeniería Química y de Petróleos.

Abstract

Title: Analysis of Results of Experimental Tests at Laboratory Scale for Optimization of the Polymer Selection Process as an Improved Recovery Method*

Authors: Martha Lidiana Chaparro Zipagauta, Rosur Joel Nariño Prada**

Keywords: polymer injection, technical difficulty, efficiency of the polymer solution, data systematization.

Description:

In the strategies for increasing the recovery factor is the implementation of improved chemical recovery, through the injection of polymers whose function is to increase the viscosity of the displacing fluid. Initially, evaluating the technical and economic feasibility through laboratory tests and through the execution of pilots. The efficiency of the polymer solution is affected by different factors that involve from the properties of the rock to the composition of the preparation water. Determining the efficiency that the polymer solution will have is key to achieve a successful injection, for this it is necessary to know the composition of the different antibodies and the affectation that the different properties of the rock and reservoir fluids will have to face, to predict the performance that it will have a polymer solution, it is necessary to establish an analysis methodology that allows to control all the tests that have been carried out in the laboratory and the results that the pilots have obtained, and in this way to improve the process of selecting commercial polymers for future intelligences, This grade work seeks to reduce costs and expenses when making a market intelligence for new injections, discarding polymers that due to their properties and composition without problems, good results compared to the properties of the deposit they face.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Hugo Alejandro García duarte, Magister en Ingeniería Química y de Petróleos.

Introducción

El agotamiento de las reservas de crudo liviano a nivel mundial plantea como una posible solución la implementación de procesos de recobro mejorado, que permitan producir volúmenes de aceite que en un principio no eran considerados viables desde el punto de vista técnico o económico.

El factor de recobro de los campos varía ampliamente dependiendo de las características específicas de la roca y los fluidos; cerca de dos tercios del petróleo original en sitio (OOIP) permanecen después de agotados los métodos de recuperación primaria. (Hartstein, 2006). Un porcentaje considerable del petróleo remanente puede recuperarse mediante tecnologías de recobro mejorado.

La inyección de agua es el proceso de recuperación adicional de petróleo más conocido e implementado en el mundo. Sin embargo, la aplicación de este proceso secundario tiene limitantes en la eficiencia de barrido. Por lo anterior, se hace preciso implementar métodos diferentes para incrementar el factor de recobro, con el fin de mejorar tanto la eficiencia volumétrica como la de desplazamiento y, de este modo aumentar el factor de recobro, incluso desde etapas tempranas del proceso de inyección de agua. (Alvarado & Manrique, 2010).

Dentro de la gran variedad de técnicas aplicadas como métodos de recobro mejorado se encuentran los métodos térmicos, que son aplicables al desarrollo de yacimientos de baja gravedad API. Otra alternativa dentro de los métodos de recuperación mejorada es la inyección de químicos. Esta familia de procesos involucra la inyección de materiales que usualmente no se encuentran en el yacimiento, entre ellos: polímero, surfactantes, álcalis, emulsiones y combinaciones de ellos.

La inyección de polímeros, la cual surge como una mejora a la inyección de agua convencional, al aumentar la viscosidad del fluido de inyección, mejorando las razones de movilidad entre el agua y el aceite, puede llegar a tener factores de recobro que varían del 5 al 15%. La inyección de polímeros es uno de los métodos de recobro químico más comúnmente aplicado. Sin embargo, este proceso tiene una serie de factores que no permiten que sea totalmente eficiente.

Las propiedades físicas de la solución polimérica guardan relación con la composición química del agua de preparación, así como con otras características físicas como los sólidos en suspensión. Diferentes parámetros del agua de preparación, la roca y fluidos del yacimiento pueden afectar negativamente la eficiencia de la solución polimérica.

Dicho esto, el presente trabajo recoge las experiencias obtenidas de los pilotos de inyección de polímero ejecutados en Colombia por Ecopetrol S.A., así como los ensayos realizados por el instituto colombiano del petróleo ICP a los campos evaluados para implementar inyección de polímeros como método de recobro mejorado, para así determinar los más importantes parámetros a estudiar y la dificultad técnica que conlleva cada uno, con el objeto de llevar a cabo la inyección de polímeros, se hace referencia a las generalidades de la inyección polímeros, tipos de polímeros usados en la industria, los problemas asociados a cada uno, polímeros comerciales evaluados por el ICP y el rendimiento de estos frente a las dificultades técnicas de cada yacimiento. De esta forma se determina las propiedades óptimas frente a cada parámetro del yacimiento, generando y sistematizando toda esta información en una macro en Excel.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Plantear una metodología de análisis y revisión de resultados de pruebas de laboratorio previamente realizadas en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) a polímeros comerciales, que permita optimizar el proceso de selección de un polímero para un campo donde aplique la tecnología.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el instituto colombiano del petróleo (ICP) para los diferentes polímeros evaluados en condiciones específicas de campos colombianos y determinar los criterios más relevantes en la evaluación y selección de los mismos.
- Jerarquizar los parámetros de selección de polímero con relación al desempeño del *polymer flooding* en procesos piloto en campo.
- Crear una metodología de análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de polímeros, con base en las características y composición de los mismos y las condiciones de yacimiento a las cual fueron evaluados.
- Generar y sistematizar en una macro en Excel, toda la información disponible de los ensayos realizados en los procesos de factibilidad de inyección de polímeros en el Instituto Colombiano del Petróleo, que permita el análisis y comparación de los diferentes productos evaluados en base a las características y composición de los polímeros y de los yacimientos en los cuales fueron implementados.

2. Marco de Referencia

2.1 Generalidades de la inyección de polímeros

La inyección de polímeros se basa principalmente en el aumento de la viscosidad del agua de inyección para controlar la movilidad de los fluidos en la formación geológica, permitiendo así generar un frente de desplazamiento más estable, el objetivo de la inyección de polímeros es inyectar dicho fluido para incrementar la presión del yacimiento, al mismo tiempo que se barre la mayor cantidad de aceite posible. Este proceso es mucho más efectivo en aquellos campos heterogéneos que contienen petróleo de viscosidad moderada (Castro.R, 2016).

El uso de soluciones de polímeros para mejorar la eficiencia de barrido volumétrico basada en una reducción de las relaciones de movilidad en los procesos de inyección de agua se ha convertido en una práctica estandarizada en la operación de diferentes campos petroleros. (Castro.R, 2016).

Los polímeros logran dar alta viscosidad a una solución acuosa, aun cuando se encuentran altamente diluidos; (Chang, 1978, August 1) afirma. La inyección de polímeros aprovecha dichas capacidades para mejorar la relación de la movilidad agua- aceite mediante el aumento de la viscosidad del agua de inyección; esto da lugar a que el yacimiento tenga un barrido más completo que con la inyección de agua que no contiene aditivos.

La movilidad de un fluido se define como la relación entre la permeabilidad efectiva sobre su viscosidad. Normalmente, cuando la razón de movilidad entre los dos fluidos en un proceso de inyección de agua es mayor o igual a 5, la inyección de polímeros surge como un buen candidato.

2.1.1 Descripción del proceso. El esquema de aplicación de la técnica de inyección de polímeros se muestra en la figura 1, en donde las concentraciones se muestran como C1, C2 y C3, de mayor a menor, respectivamente. Este fluido es inyectado por medio del pozo inyector (izquierda), y se desplaza hacia la derecha.

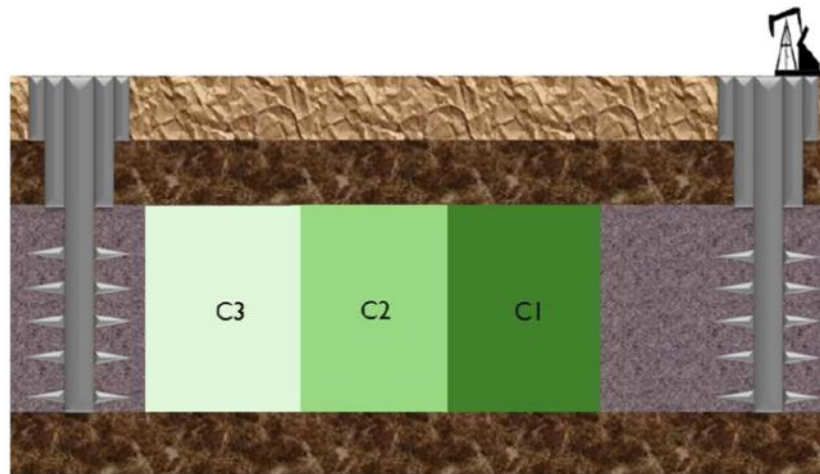


Figura 1. Esquema de inyección de polímeros. Adaptado de Willhite, P.(2003). Enhanced Oil Recovery. SPE textbook series

Este proceso inicia con la inyección de un bache de agua de salinidad menor a la de la salmuera presente en el fondo, el cual tiene como objetivo acondicionar el yacimiento al arrastrar la mayor cantidad de sales posibles, estableciendo un PH óptimo para el uso de las soluciones poliméricas. Este paso puede ser omitido en yacimientos donde se ha efectuado un proceso de inyección de agua.

A continuación, se recomienda inyectar 3 baches de solución polimérica seguidos, cuya concentración será reducida sistemáticamente desde el primero hasta el último, para luego bombear un bache de agua que empuje lo inyectado previamente. Realizar este procedimiento tiene dos objetivos principalmente: el primero, reducir los costos asociados a la compra de polímeros, y

el segundo evitar que entre un bache y otro se produzca en gran medida el fenómeno de digitación viscosa.

La inyección de agua polimerizada se aplica normalmente cuando en la etapa de producción se observa una de las siguientes situaciones:

- La relación de movilidad de inyección de agua es alta
- La heterogeneidad del yacimiento es alta

Valores pequeños de la relación de movilidades aumentan el barrido macroscópico de la fase desplazante, permitiendo mayor recuperación de petróleo. (Jiménez, 2010).

2.2 Parámetros significativos de los polímeros

Durante el proceso de revisión de la información de los ensayos realizados por el instituto colombiano del petróleo (ICP) en los últimos años, es importante conocer las propiedades más relevantes de los polímeros y así comprender cuál es la influencia de estas propiedades en la eficiencia de la solución polimérica cuando esta se enfrenta a un proceso de inyección.

2.2.1 Composición. Según (Sorbie.K., 1991), los polímeros son compuestos químicos de muy alto peso molecular, resultantes de la unión de moléculas más simples denominadas monómeros. Existe una gran cantidad de polímeros en la naturaleza, y su clasificación se basa según su origen orgánico o inorgánico. A pesar de que la principal característica de estos químicos es su poder viscosificante (una propiedad física), es importante conocer la estructura de la molécula

de polímero para entender ciertos fenómenos como el comportamiento de flujo en el medio poroso, adsorción/retención, y estabilidad mecánica y térmica.

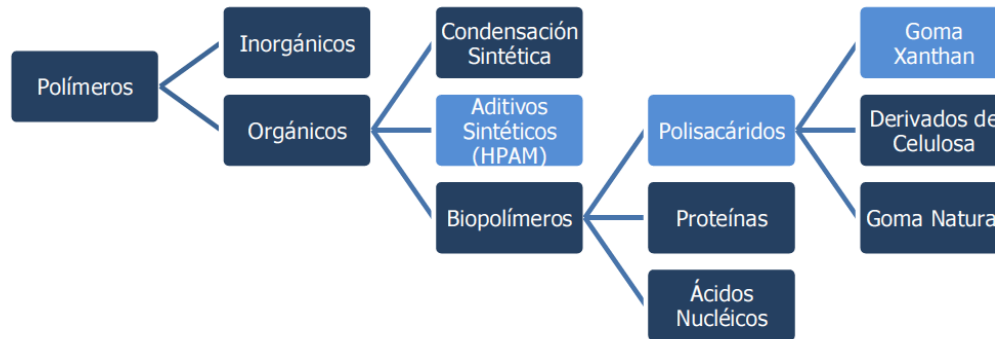


Figura 2. Tipos de polímeros. Adaptado de (Stright, 2008).

Los Polímeros que se han utilizado como objeto de evaluación para la inyección de comprenden dos tipos generales: polímeros sintéticos y biopolímeros. Un polímero sintético casi siempre significa poliacrilamidas.

2.2.1.1 Poliacrilamida. Un polímero lineal, no iónico, compuesto de monómeros de acrilamida. Las poliacrilamidas de alto peso molecular se utilizan como floculantes selectivos en la perforación con agua limpia, lodos con bajo contenido de sólidos y limpieza de aguas residuales. Los polímeros compuestos de moléculas más pequeñas se utilizan como defloculantes de arcilla en lodos a base de agua, que pueden contener iones de dureza. Las poliacrilamidas no son tan sensibles a la salinidad y la dureza como los poliacrilatos aniónicos. Además, al ser no iónicos, no son tan potentes para aplicaciones de floculación o defloculación. Sin embargo, los polímeros de acrilamida son susceptibles a la hidrólisis y liberan amoníaco en condiciones alcalinas y de calor. (Schlumberger, 2019).

El rendimiento de una poliacrilamida en durante una inyección dependerá de su peso molecular y grado de hidrólisis. Un polímero de alto peso molecular producirá viscosidades y factores de resistencia más altos que un polímero de bajo peso molecular para una concentración dada. Estas ventajas potenciales pueden ser compensadas por una mayor tendencia a la degradación por cizallamiento, que reduce el peso molecular, y por una inyectividad reducida, que puede ser significativa en formaciones de baja permeabilidad.

Las poliacrilamidas tienen un precio relativamente bajo, desarrollan buenas viscosidades en aguas dulces y se adsorben sobre la superficie de roca para producir una reducción de permeabilidad de larga duración (el efecto de resistencia residual). Sus desventajas principales son una tendencia a la degradación por cizallamiento a altas velocidades de flujo y un rendimiento pobre en agua de alta salinidad (SNF, 2016).

Para entender el comportamiento químico de las poliacrilamidas, es necesario definir conceptos como polielectrolito y polímero asociativo, que son base para el estudio de la degradación mecánica y térmica de los polímeros.

Polielectrolito: Es un polímero que dentro de su estructura macromolecular contiene cargas electrostáticas y que, al estar en contacto en un medio polar como el agua, tiene la capacidad de expandirse debido a las fuerzas de repulsión internas, generando un gran estiramiento de las cadenas y logrando así una alta viscosidad. Pero si las sales esta presentes o son adicionadas la viscosidad disminuye debido a un efecto de apantallamiento donde las repulsiones disminuyen y las macromoléculas se retractan

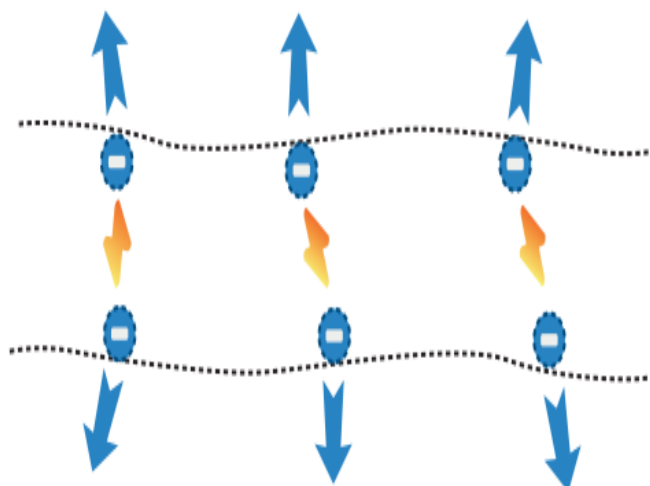


Figura 3. Representación de un polielectrolito. Adaptado SNF. (2016).Geología del petróleo, sistemas petrolíferos EOR.SNF.

Polímero asociativo (espesador asociativo): Son polímeros hidrófilos conteniendo algunos grupos hidrofóbicos. Una red es creada por interacciones hidrofóbicas en el agua. Estas interacciones crean una red física y altas viscosidades pueden ser obtenidas. (SNF, 2016).

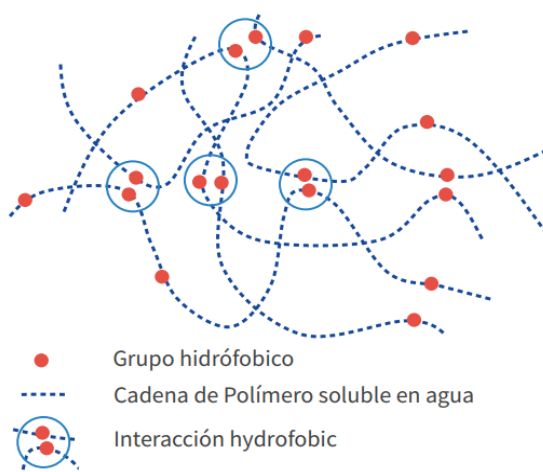


Figura 4. Representación de un polímero asociativo. Adaptado SNF. (2016).Geología del petróleo, sistemas petrolíferos EOR.SNF.

Dos tipos de polímeros han sido usados para aplicaciones en campo; polisacáridos y poliacrilamidas. El más usado en aplicaciones EOR es la poliacrilamida parcialmente hidrolizada, (HPAM, por sus siglas en inglés). (Manrique.E, 2010).

El HPAM exhibe significativamente mayores viscosidades que los polisacáridos, la implementación es relativamente fácil y puede mejorar significativamente la tasa de recuperación a condiciones estándar del yacimiento. Este polímero está disponible en varios pesos moleculares y se puede utilizar para temperaturas hasta de 99° Celsius dependiendo de la dureza de la salmuera. Existen diferentes tipos de modificaciones tales la poliacrilamida sulfonada que se pueden utilizar hasta 104° y 120° C. Algunas experiencias reportadas muestran alta sensibilidad a la salinidad, presencia de aceite o surfactante y otros productos químicos. (Abidin.A, 2012).

Levitt & Pope (2008) reportaron que polímeros de acrilamida hidrolizada no deberían precipitar en yacimientos con temperatura de hasta 100° C y agua con contenidos de calcio por debajo de 200 ppm. Para altas concentraciones de calcio y elevadas temperaturas han evaluado a escalas de laboratorio copolímeros de acrilamida mejorados con metaborato de sodio y carbonato de sodio que desarrollaron mayor estabilidad en su viscosidad.

De acuerdo con (Luo, 2001) a altos esfuerzos de corte, las estructuras organizadas en redes de polímeros son alteradas y de esta forma la viscosidad es significativamente reducida, Sin embargo, cuando se redujo el esfuerzo de corte aplicado, la red estructural del polímero se restauró y la viscosidad se incrementó nuevamente. La reversibilidad de cizalla es altamente beneficiosa en aplicaciones en campo para recuperación mejorada de petróleo, ya que mejora la inyectividad en el pozo debido al efecto de adelgazamiento por cizalla en los perforados y las áreas cercanas a la cara del pozo. Lejos de la cara del pozo la velocidad de flujo es reducida y la viscosidad restaurada.

(Broseta et al, 1995) concluyeron que la presencia de aceite residual disminuye la adsorción de polímero en medios porosos con mojabilidad al aceite; se observó una tendencia inversa en medios porosos con mojabilidad preferente al agua, en consecuencia, recomiendan evaluar previamente la mojabilidad del yacimiento en proyectos de inyección de polímeros. Otros investigadores concluyen que la inyección de polímeros puede reducir la permeabilidad relativa de la fase acuosa (Barreau,1999). Por su parte, Huh & POPE (2008) observaron que la saturación de aceite residual es menor, después de un proceso de inyección de polímero que después de un proceso análogo de inyección de agua. (Jiménez, 2010).

2.2.2 Peso molecular promedio. La variable que define fundamentalmente las propiedades físicas y químicas de un polímero es su peso molecular. Sin embargo, una característica de estos materiales es que el peso molecular se determina por circunstancias aleatorias que dependen de una gran cantidad de variables. (Mier, 1997).

Una caracterización completa del polímero requiere conocer exactamente la distribución de pesos moleculares en la muestra. Las técnicas utilizadas para conocerla son el fraccionamiento y la cromatografía de exclusión por tamaños, también llamada cromatografía por permeación de gel; muchas propiedades de los polímeros se deben al alto peso molecular, como por ejemplo la resistencia mecánica, la elasticidad de los cauchos, la temperatura de transición vítrea de plásticos amorfos o la temperatura de fusión de fibras y materiales semicristalinos, se deben al alto peso molecular de los mismos. En la tabla 1 se muestra a modo de ejemplo, el estado de agregación de una serie de moléculas de alcanos de la misma estructura química y creciente peso molecular. (Beltran, 2012).

Tabla 1.

Efecto del tamaño de la molécula sobre su estado de agregación.

Número de unidades -CH ₂ -CH ₂ -	Peso Molecular	Estado físico a 20° C
1	30	Gas
6	170	Líquido
35	1000	Grasa
430	>12000	Resina

Nota: Adaptado de (Beltran, 2012)

La molécula de etano (1 unidad) de repetición es gaseosa, pero al aumentar su tamaño hasta 6 unidades de repetición pasa a ser líquida, y conforme se va adicionando más monómero se convierte en un aceite, una cera y finalmente material sólido.

2.2.3 Hidrólisis. El grado de hidrólisis puede afectar propiedades físicas tales como sensibilidad a la salinidad y dureza, estabilidad mecánica y características de adsorción. Un alto grado de hidrólisis induce a un desbalance en la repulsión entre los grupos aniónicos carboxilo a lo largo del polímero, ocasionando la precipitación del polímero en solución. Según Zatouin y Potie (1983), si el grado de hidrólisis excede aproximadamente 0.33 (33%) es posible la precipitación si están presentes cantidades excesivas de cationes multivalentes. La concentración crítica de calcio necesaria para precipitar la poliacrilamida hidrolizada, disminuye con la temperatura y con la disminución de cationes monovalentes. A altos grados de hidrólisis esto ha sido descrito como fenómeno de fijación de sitio que ocurre alrededor del punto de equivalencia estequiométrica entre la fracción de acrilato y los cationes (alrededor de 200 ppm de calcio y 1000 ppm de solución polimérica).

La hidrólisis alcalina de la poliacrilamida ocurre en dos etapas distintas y se pueden obtener conversiones completas. En los estados iniciales (tiempos muy cortos) la velocidad de la reacción

es igual a la velocidad de hidrólisis para compuestos modelos de bajo peso molecular; cuando la conversión aumenta, la velocidad disminuye debido al efecto vecinal de los grupos carboxílicos que se van formando, los cuales repelen los grupos OH⁻. Después de 40 % de conversión ocurre un cambio conformacional en las cadenas debido a que se alcanza una concentración crítica de cargas, lo cual hace que las cadenas se desenrollen súbitamente. La velocidad de hidrólisis disminuye aún más después de este cambio conformacional, llegando a ser un 10 % de su valor inicial (referencias).

La hidrólisis es la ruptura de los lazos en grupos funcionales por la reacción con agua. Esta reacción se produce principalmente en polímeros que toman mucha humedad y que tienen grupos sensibles al agua en la espina dorsal del polímero. Algunos polímeros sintéticos que se degradan cuando se exponen a la humedad incluyen poliésteres, polianhidruros, poliamidas, poliéteres y policarbonatos. La tasa de degradación hidrolítica puede variar de horas a años dependiendo del tipo de grupo funcional, estructura de la espina dorsal, morfología y pH. Los polímeros que se degradan fácilmente en presencia de agua incluyen polianhídridos, poliésteres alifáticos y ciertos poli (aminoácidos) como el poli (ácido glufórico). la tasa de hidrólisis disminuye en el orden anhídrido > éster > > amida > > éter.

Para entender el concepto de hidrólisis parece lógico partir desde el término “degradación”, pues como se ha comentado anteriormente la hidrólisis es un tipo de degradación.

El término degradación en polímeros se entiende como la modificación de su estructura a través de unos factores como la luz solar, el calor u otros agentes atmosféricos. Los cambios que un polímero puede experimentar son de tipo físico y/o químico:

- Físicos: pérdida de brillo, pérdida de propiedades mecánicas, etc.
- Químicos: rotura de cadenas, reacciones de entrecruzamientos, etc.

En la biodegradación de polímeros por hidrólisis química el agua penetra en el objeto biodegradable, hinchándolo y atacando principalmente a los enlaces éster inestables, una vez que se ha debilitado el entrecruzamiento del polímero, rompiendo enlaces secundarios que unen las cadenas principales y convirtiendo dichas cadenas del polímero en fragmentos de cadenas cortas solubles en agua.

La hidrólisis, de forma general, consiste en la división de una molécula principal en dos de menor energía debido a que una molécula de agua se divide y pasa a formar parte de la molécula principal, rompiendo uno de los enlaces de la cadena principal (figura 11). Por lo tanto, existen varios tipos de hidrólisis dependiendo del contexto, como, por ejemplo, hidrólisis ácido-base, hidrólisis enzimática, hidrólisis en amidas y ésteres, etc. (Alejandro, 2013)

La hidrólisis de la poliacrilamida se hace con el fin de mejorar sus propiedades tales como la solubilidad, la retención y viscosidad. Un grado de Hidrólisis alrededor de 25-30% significa que 25-30% de las fracciones de acrilamida en el copolímero son hidrolizadas a ácido acrílico. Otra interpretación dada por los autores expresa que si una poliacrilamida está hidrolizada al 5% significa que 95 de cada 100 unidades monoméricas son grupos acrilamida sin carga y el 5% son grupos acrílicos cargados negativamente. (Ecopetrol, 2016).

La interacción de los parámetros mencionados hace del flujo de soluciones poliméricas en medios porosos un proceso complejo. Adicionalmente, la incertidumbre en la caracterización del yacimiento hace que el diseño y la implementación de un proyecto robusto de inyección de polímero se un desafío. Un mal diseño e implementación de un proceso de inyección de polímero podría incluso causar una reducción en la producción de aceite. (Jiménez, 2010), por esta razón, es necesario conocer la degradación a la que se ve sometida la solución polimérica para definir los parámetros del yacimiento que afectan el proceso de recobro mejorado.

3. Factores que afectan la integridad del polímero con relación al desempeño del polymer flooding en procesos piloto en campo.

Los polímeros pueden sufrir degradaciones debido a distintos factores, los cuales deben ser controlados según sea posible, o evitados, dependiendo de las condiciones del yacimiento.

3.1 Tipos de degradación

3.1.1 Degradación mecánica. Este tipo de degradación es ocasionada principalmente por abruptos cambios de presión, en dispositivos que generan cizallamiento, ocasionando una notable reducción de la viscosidad.

Como se mencionó anteriormente, las poliacrilamidas son sensibles al cizallamiento, lo que genera un acortamiento en la macromolécula, modificando sus propiedades viscosificantes. Los polímeros de menor peso molecular son mucho menos sensibles al cizallamiento (SNF, 2016). Para controlar la degradación mecánica de los polímeros se debe prestar atención a:

- velocidad del fluido
- Equipos de disolución e inyección en superficie
- Leneas de inyección (restricción/estrangulamientos)
- Superficie de perforaciones
- Permeabilidad del yacimiento
- La reducción de la superficie de inyección por taponamiento

(Pancharoen, 2010) Afirma que, a una velocidad de corte constante, la viscosidad de las soluciones poliméricas es mayor para concentraciones altas de polímero. Adicionalmente la viscosidad de las soluciones poliméricas disminuye cuando la velocidad de corte incrementa. Este comportamiento es favorable en las implementaciones de inyección de polímeros, ya que la solución polimérica se propaga en el yacimiento a una velocidad de corte muy baja y el incremento en la viscosidad de la solución permite una mejor eficiencia de barrido.

3.1.2 Degradación química. Es la degradación que ocurre por agentes químicos como el oxígeno, ácidos y agua. Las más importantes son la degradación oxidativa y por hidrólisis.

3.1.2.1 Degradación oxidativa. Esta degradación se produce por oxidantes el más usual es el **oxígeno**. La oxidación de los polímeros puede originar cambios no deseados en sus propiedades mecánicas y eléctricas. La resistencia de un polímero a la oxidación en primer lugar depende de su estructura química. La introducción de átomos de flúor aumenta la resistencia química haciendo los polímeros más estables a la oxidación. (González-Prolongo, 1997).

La forma más eficiente de reducir la degradación es remover el oxígeno y posteriormente introducir nitrógeno en los equipos de disolución. (Sorbie.K., 1991).

3.1.3 Degradación Térmica. (González-Prolongo, 1997) Afirma que la temperatura afecta el envejecimiento de los materiales poliméricos. El aumento de la temperatura favorece el progreso de las reacciones degradativas, la estabilidad térmica se indica por la temperatura a la que se notan los primeros indicios de descomposición. La estabilidad es debida al tipo de enlaces químicos

presentes. Las reacciones que experimentan los polímeros a elevadas temperaturas son de dos tipos:

Reacciones de ruptura de la cadena principal: Cuando los polímeros se calientan a 200° Celsius, la energía se aproxima a la energía de enlace C-C produciéndose la disociación a ruptura.

Algunos polímeros se descomponen en sus monómeros cuando se calientan a elevadas temperaturas, Mientras que otros se descomponen en fragmentos moleculares de mayor tamaño que sus unidades monoméricas. La presencia de sustituyentes laterales disminuye la estabilidad térmica. En la figura 5 se puede observar la representación de una cadena polimérica con sustituyentes laterales.

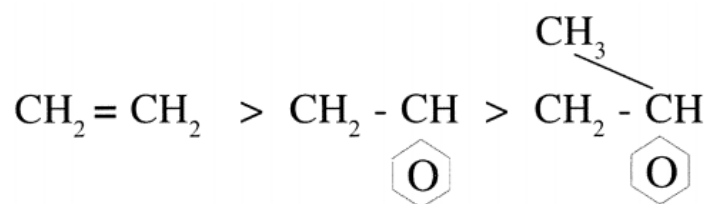


Figura 5. Representación de una cadena polimérica con sustituyentes laterales. Adaptado de (González-Prolongo, 1997)

Reacciones sin ruptura de la cadena principal: Muchos polímeros cuando se calientan a elevadas temperaturas dan lugar a reacciones en las que los sustituyentes son eliminados formando productos más estables.

La degradación térmica del polímero se encuentra relacionada con la hidrólisis y la precipitación de cationes divalentes. Por encima de 50° Celsius, la hidrólisis del polímero ocurrirá generando un aumento de la anionicidad, cuando estos valores se encuentran por encima del nivel crítico (35% al 40%), se genera precipitación de iones divalentes (Ca²⁺, Mg²⁺) ocurrirán causando la pérdida de viscosidad. (Thomas & N, 2013). Cuando el yacimiento tiene una alta

temperatura, los polímeros de baja anionicidad son una alternativa práctica para conservar la calidad del proceso de inyección de la solución polimérica. La microestructura del polímero y la anionicidad deberían ser seleccionados con cuidado y controlados para minimizar la degradación térmica. (SNF, 2016).

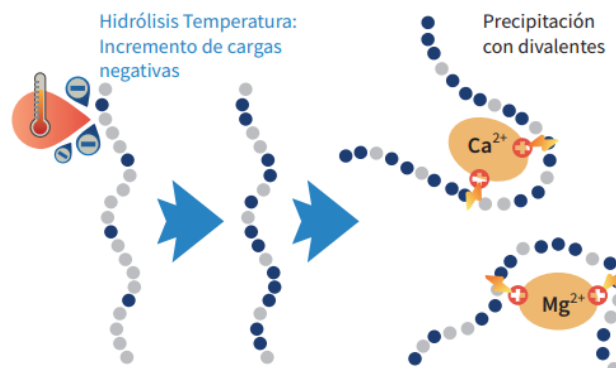


Figura 6. Degradación térmica. Adaptado de (SNF, 2016).

Los copolímeros de acrilamida/ ácido acrílico son estables hasta 75° Celsius. Por encima de 75° C y hasta 120° C, los polímeros que contienen acrilamida/ ATBS y/o otro monómero térmico resistente pueden ser usados. (SNF, 2016).

3.2 Propiedades fundamentales de la roca y los fluidos que afectan la inyección de polímeros

Yacimientos con rangos de criterio difícil en las propiedades de yacimiento y fluido poseen retos tecnológicos grandes, para el diseño e implementación de un piloto de recobro, lo cual usualmente afecta el análisis económico del proceso.

3.2.1 Salinidad del agua de formación y cationes divalentes. Independiente del tipo de polímero la salinidad afecta negativamente a la viscosidad. A mayor salinidad menor viscosidad final de la solución polimérica.

La salinidad del agua de formación debe ser compatible con la solución polimérica. La salinidad de formación y los cationes divalentes afectan el comportamiento reológico principalmente la viscosidad de la solución polimérica cuando ocurre la mezcla entre ambas aguas en el medio poroso. Con base en las dificultades tecnológicas, la salinidad y cationes divalentes del agua de formación en la inyección debería ser mucho menor que 50.000 y 200 ppm, respectivamente. En yacimientos con una alta salinidad, biopolímeros con alta tolerancia a la salinidad deben ser usados. (Garcia & Hinds, 2017).

La viscosidad de la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) disminuye cuando se añade una sal monovalente (por ejemplo, NaCl). Debido a que la sal añadida neutraliza la carga de las cadenas laterales de la HPAM. Cuando el HPAM se disuelve en agua, el ion Na^+ se disipa. Los grupos carboxilos $-\text{COO}-$ en las cadenas de alto peso molecular se repelen entre sí, lo que ocasiona un estiramiento de la molécula, un aumento del volumen hidrodinámico y un aumento de la viscosidad. Cuando se añade sal, el grupo $-\text{COO}-$ es rodeado por un ion Na^+ , que cubre la carga. La repulsión del grupo $-\text{COO}-$ disminuye, el volumen hidrodinámico se hace más pequeño y la viscosidad decrece.

3.2.2 Temperatura del yacimiento. Varios investigadores consideran que la temperatura debe ser menor de 200° Fahrenheit para los proyectos de álcali/surfactante/polímero. La temperatura controla la selección del polímero, ya que este debe ser tolerante a la temperatura de yacimiento. (Taber, 1997), Sin embargo, existen termo-polímero que contiene monómeros

aniónicos, permanece estable por 120 días a una temperatura de 120° C, 20,000 ppm de sólidos disueltos y un contenido de cationes divalentes de 1800 ppm. (Garcia & Hinds, 2017). Bajas temperaturas requieren polímeros tales como poliacrilamida parcialmente hidrolizada (HPAM) y mínimas cantidades de aditivos químicos con menos costo.

3.2.3 Permeabilidad de la formación. La permeabilidad de la formación es un parámetro crítico para la selección del polímero. En las formaciones con muy bajas permeabilidades, el polímero podría no fluir a través de los poros. Los proyectos de inyección de polímero tienen permeabilidades más altas que 800 mD. El criterio de dificultad para la permeabilidad es aproximadamente 50 mD.

3.2.4 Oxígeno/ Hierro. El oxígeno con niveles superiores a 20 ppb ocasiona la degradación química de los polímeros. Sin embargo, esta reacción está fuertemente catalizada por hierro sulfuros, y otros elementos o compuestos que puedan generar radicales libres (Sorbie.K., 1991). El hierro, normalmente presente en las aguas por efecto de la corrosión, cataliza la reacción de degradación química de los polímeros en presencia de trazas de oxígeno. Actualmente se ha fijado un límite de 2 ppm como máximo y adecuado para este elemento (sin presencia de hierro). El control del oxígeno se logra por medios físicos y químicos. En caso de agua con alto contenido de oxígeno, la desoxigenación mecánica por vacío es obligatoria. (David & Levitt, 2008). A los métodos mecánicos se suma el control químico, el cual siempre debe prevalecer, ya que la presencia de oxígeno afecta tanto la estabilidad del polímero como la calidad del crudo, y genera problemas de corrosión.

La *figura 7* presenta el efecto del ion férrico (Fe^{+3}) sobre la viscosidad de la HPAM. Se puede apreciar que a concentraciones por debajo de 15 ppm de Fe^{+3} , las pérdidas de viscosidad a corto plazo no son significativas. A medida que aumenta la concentración de Fe^{+3} , este se entrecruza con la HPA formando un gel insoluble lo que redunda en mayores pérdidas de viscosidad. Este efecto se acentúa a medida que pasa el tiempo. (Jiménez, 2010).

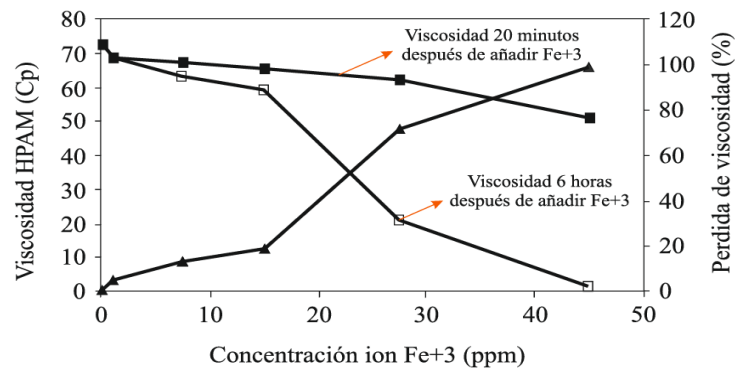


Figura 7. Efecto del Fe^{+3} sobre la viscosidad de la HPAM. Adaptado de (Sheng, 2011)

En el mismo sentido la *Figura 8* presenta el efecto del ion Fe^{+2} sobre la viscosidad de la HPAM (1000 ppm). Se puede observar que, en un sistema cerrado, por debajo de los 10 ppm de Fe^{+2} , las pérdidas de viscosidad no exceden el 10%. Sin embargo, en un sistema abierto las pérdidas de viscosidad si son apreciables, alcanzando más del 80% con menos de 10 ppm de Fe^{+2} .

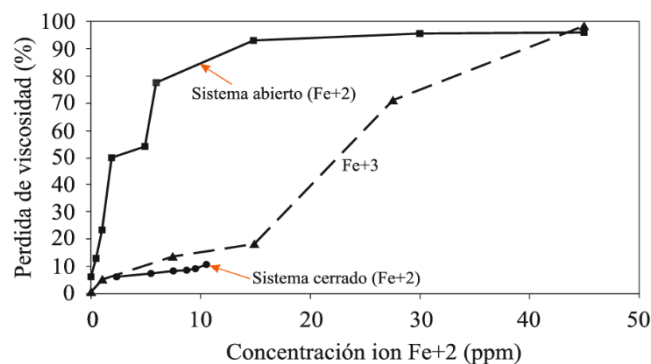


Figura 8. Efecto del Fe^{+2} sobre la viscosidad de la HPAM. Adaptado de (Sheng, 2011)

En el sistema abierto, el Fe^{+2} se oxida a Fe^{+3} , produciéndose un radical libre O_2^- el cual reacciona con la HPAM produciendo peróxido y rompiendo las cadenas estructurales de la poliacrilamida, lo cual ocasiona reducciones significativas de viscosidad. Por tal razón, la concentración de hierro debe estar por debajo de 0.5 ppm en el agua para preparación de soluciones poliméricas para recobro mejorado.

En la *Tabla 2* se muestra la jerarquización de las propiedades de la roca y fluidos que afectan la integridad del polímero con relación a la dificultad técnica de diseño e implementación de la inyección de polímeros en procesos piloto en campo.

Tabla 2.

Jerarquización de parámetros en base a la dificultad técnica de la inyección de polímeros.

# según prioridad	Propiedades de la roca y los fluidos
1	Temperatura
2	Viscosidad del aceite
3	Salinidad (TDS, ppm)
4	(Ca^{2+} , Mg^{2+})
5	Fe^{2+} Divalente O_2 Disuelto
6	Permeabilidad

Para estimar la eficiencia que tendrá el polímero antes de la aplicación en campo, y la afectación frente a los parámetros expuestos en la tabla anterior, la solución polimérica se somete a diferentes ensayos de laboratorio.

4. Ensayos realizados para la evaluación y selección de polímeros para considerar la aplicación en campo

Durante el proceso de revisión de los resultados obtenidos por el instituto colombiano de petróleo (ICP) para cada campo, se evidencian los numerosos pasos que están involucrados en los métodos de evaluación, ya que se requiere un conocimiento detallado de las propiedades y de los factores de costos para seleccionar los productos óptimos para una aplicación dada. Mucha de esta información puede ser obtenida únicamente por medio de estudios detallados de laboratorio bajo condiciones de yacimiento específicas.

A continuación se describen los ensayos que son considerados para la ejecución de este proyecto y el procedimiento bajo las cuales fueron realizadas de acuerdo con las normas e instructivos de ensayo del instituto colombiano del petróleo (ICP).

Los ensayos descritos en este numeral, están basados en las prácticas recomendadas API RP63 de 1990 (Recommended Practices for Evaluation of Polymers Used in Enhanced Oil Recovery Operations), en revisiones bibliográficas y en recomendaciones que algunos asesores hicieron al instituto colombiano del petróleo (ICP).

4.1 Caracterización básica de los polímeros.

Los parámetros medidos fueron espectro infrarrojo, porcentaje de hidrólisis para los polímeros tipo poliacrilamida hidrolizada no sulfonada y porcentaje de humedad. Estos valores se comparan con

los valores disponibles en las fichas técnicas o en los certificados de análisis entregados por los proveedores.

4.1.1 Espectro infrarrojo. La espectroscopia infrarroja se basa en el hecho de que las moléculas tienen frecuencias a las cuales rotan y vibran, es decir, los movimientos de rotación y vibración moleculares que tienen niveles de energía discretos (modos normales vibracionales). El análisis vibracional de los materiales poliméricos a través de las espectroscopias, es un método experimental apropiado para obtener información sobre parámetros estructurales de los mismos. Así, además de poderse analizar las especies químicas presentes en el compuesto, es posible obtener entre otros, datos sobre el estado de orden de los polímeros (orientación de cadenas, cristalinidad, fases cristalinas, etc.) (Pastor & Jawhari, 2003).

El espectro Infrarrojo (IR) puede usarse para identificar un compuesto e investigar la composición de una muestra. Se asimila a una huella digital, la cual es única para cada compuesto. Cambios sutiles en la composición pueden identificarse fácilmente por esta técnica, ya que cada banda está asociada con los grupos funcionales presentes en la muestra. La medida se realiza en un equipo espectrofotómetro, instrumento que mide la cantidad de luz absorbida o emitida por una muestra a una longitud de onda específica, la cual, según la Ley de Beer, es proporcional a la concentración del soluto o absorbente en la muestra.

Para el análisis por espectroscopia infrarroja, se colecta el espectro FT-IR de una muestra de polímero conforme al Instructivo Técnico de Ensayo (ITE) CLX-LQP-I-024. Se emplea un Espectrofotómetro de infrarrojo medio con celda de reflectancia total atenuada Mir-Atr Shimadzu Prestige. Esta técnica permite la obtención de espectros IR directamente sobre muestras sólidas, lo cual es ideal para el análisis de muestras opacas. (Ecopetrol, 2016).

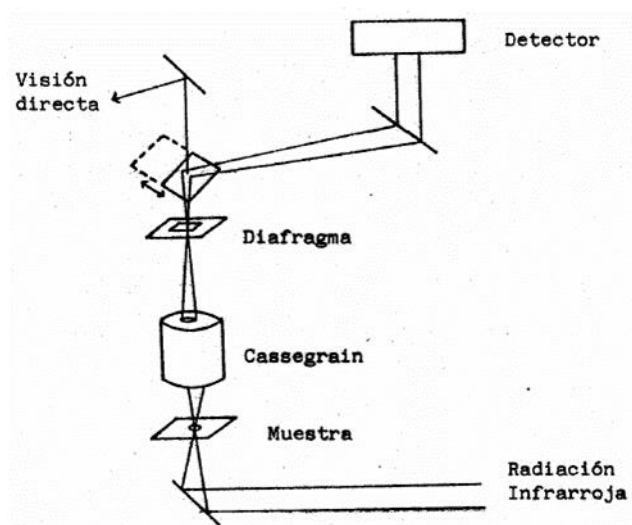


Figura 9. Esquema del espectro infrarrojo por transformada de Fourier con sistema microscopio.

Adaptado de (Pastor & Jawhari, 2003)

4.1.2 Determinación del porcentaje de humedad. Las muestras de laboratorio a menudo contienen agua que está en equilibrio con la atmósfera. En consecuencia, a menos que se tomen medidas especiales, la composición de una muestra depende de la humedad relativa y de la temperatura ambiente en el momento que se analiza. En algunos casos es conveniente eliminar el contenido de agua o disminuirlo a un nivel determinado. Una tercera alternativa es determinar el contenido de agua cuando se pesan las muestras para el análisis de modo que los resultados se puedan corregir luego refiriéndose a “base seca”. En cualquier caso, es conveniente realizar algún tipo de tratamiento previo para tener en cuenta la presencia de agua.

Existen dos formas de agua en los sólidos: agua esencial y agua no esencial. El agua esencial forma parte integral de la estructura molecular o cristalina de un compuesto en estado sólido; Por otro lado, el agua no esencial se retiene en el sólido como consecuencia de fuerzas físicas, no es necesaria para caracterizar la constitución química de la muestra y por consiguiente no guarda ninguna proporción estequiométrica. Como agua no esencial existen tres tipos: el agua

adsorbida (aquella que es retenida en la superficie de un sólido), agua sorbida (aquella que es retenida como fase condensada en los intersticios del sólido) y el agua ocluida (aquella que es retenida en los huecos microscópicos situados irregularmente en los cristales del sólido). En el caso los polímeros, la humedad corresponde a agua no esencial.

Para los polímeros en presentación sólido pulverizado, la determinación de la humedad se efectúa de acuerdo con el ITE CLX-LQP-I-038. Este ensayo consiste en pesar una cantidad determinada de muestra de polímero y someterlo a una temperatura en la cual el agua libre es eliminada por vaporización. Por la diferencia entre los pesos de la muestra húmeda y deshidratada, se determina la cantidad de agua libre presente en la muestra. El porcentaje de humedad en las muestras de polímero es un dato necesario al momento de la determinación del porcentaje de hidrólisis y en la preparación de las soluciones de dicha sustancia. Para las pruebas realizadas a los diferentes polímeros, se pesan 1.5 g de polímero en un vidrio de reloj limpio y seco. La muestra se calienta en la estufa por 30 minutos a una temperatura entre 100-105 °C. La muestra se dispone en desecador por 30 minutos. Después de pesar la muestra hasta peso constante, se calcula la humedad de acuerdo con la siguiente formula.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100$$

4.1.3 Determinación del porcentaje de hidrólisis en poliacrilamidas. La determinación del Porcentaje de hidrólisis se realiza de acuerdo al Instructivo Técnico de Ensayo CLX-LQP-I-039. Este ensayo consiste en la titulación potenciométrica con un ácido (HCl) y una base (NaOH), posteriormente se realiza el cálculo del porcentaje utilizando además el porcentaje de humedad del polímero.

Se pesan 200 g de solución polimérica de 1000 ppm preparada en agua. El pH se ajusta a 3 con solución de HCl 1 N y se deja estabilizar por 30 min (se registra el volumen). La mezcla se lleva a pH 3.3 con solución de NaOH 0.1 N (se registra el volumen). Se continua la adición de NaOH 0.1 N hasta pH 7 (se registró el volumen). Se calculó el grado de hidrólisis con la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Hidrólisis} = \frac{V * N * 0.072}{0.2 * (1 - M)} * 100$$

Donde,

V = Volumen de NaOH gastado de pH 3.3 a 7.0

M = Humedad del polímero

N = Normalidad del NaOH

0,72= Mili equivalentes del ácido acrílico en la muestra.

0,2= Peso del polímero en la alícuota de 200 mL.

4.1.4 Comportamiento reológico de las soluciones poliméricas. La Reología es la ciencia del flujo y la deformación. Es una rama de la física y de la fisicoquímica ya que la mayoría de las variables importantes proceden del campo de la mecánica: fuerzas, deflexiones y velocidades. El término “Reología” se origina del griego: “rhein” que significa “fluir”. Es decir, los experimentos reológicos no simplemente revelan información sobre el comportamiento de flujo de los líquidos sino también acerca del comportamiento de deformación de los sólidos. La conexión entre estos términos es que una gran deformación producida por fuerzas de cizalla causa que los materiales fluyan.

Para todos los fluidos, las moléculas muestran movimiento relativo entre ellas, y este proceso siempre está acompañado por fuerzas de fricción interna. Por lo tanto para todos los fluidos

en movimiento, una cierta resistencia al flujo ocurre, la cual puede ser determinada en términos de la viscosidad.

En términos prácticos, los fluidos en general pueden categorizarse como Newtonianos (agua y aceites minerales) y no Newtonianos (Pastas, geles, soluciones poliméricas, etc.). Los primeros siguen la ley de viscosidad de Newton, en la cual la viscosidad es independiente de la tasa de cizallamiento aplicada (a una temperatura dada) y del tiempo en si tal y como se describe a continuación:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

Donde,

τ = Esfuerzo de corte

μ = Viscosidad

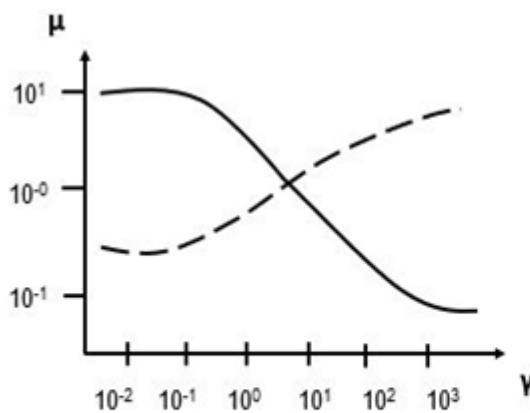
$\dot{\gamma}$ = Tasa de corte

La cual puede ser interpretada como la variación de la velocidad en función de la posición dentro del fluido. En el caso particular de los fluidos no newtonianos (fluidos de interés, pues las soluciones poliméricas son fluidos de este tipo) no se puede hablar de un único valor de viscosidad, pues ella en si es una función de la tasa de corte. En este caso se habla de una viscosidad aparente η , la cual es expresada en función de una temperatura y una tasa de corte dada.

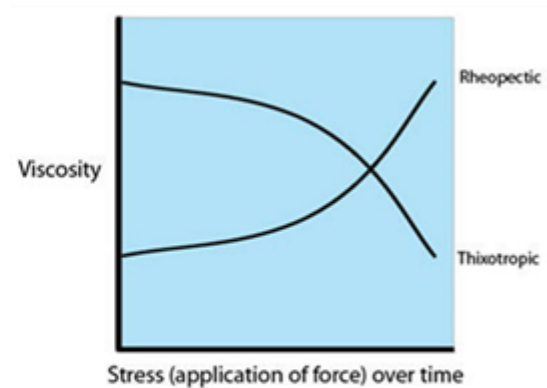
$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$$

Dentro del carácter dependiente del tiempo y de la tasa de corte propia de los fluidos No Newtonianos, se pueden diferenciar varios comportamientos característicos.

- **Comportamiento pseudoplástico (Shear Thinning):** La viscosidad disminuye con el incremento de la tasa de corte.
- **Comportamiento dilatante (Shear Thickening):** La viscosidad aumenta con el incremento de la tasa de corte.
- **Comportamiento tixotrópico:** La viscosidad disminuye con el esfuerzo de corte a lo largo del tiempo.
- **Comportamiento reopéctico:** La viscosidad aumenta con el esfuerzo de corte a lo largo del tiempo.



Esquema de comportamiento pseudoplástico y dilatante



Esquema de comportamiento reopéctico y tixotrópico.

Figura 10. Esquema de comportamientos de los fluidos no newtonianos. Adaptado de (Ecopetrol, 2016)

Como se mencionó previamente, las soluciones poliméricas son generalmente pseudoplásticas y la forma más común de graficar su comportamiento reológico es mediante la relación entre la viscosidad y la tasa de corte.

Las soluciones diluidas muestran normalmente comportamiento Newtoniano a tasas de corte suficientemente bajas, seguidas por una región pseudoplástica en la cual la viscosidad del fluido disminuye. A tasas de corte elevadas la tendencia es que la viscosidad se aproxime a un segundo régimen Newtoniano ligeramente superior a la viscosidad de la fase que actúa como solvente.

La finalidad principal del estudio del comportamiento reológico radica en la determinación de las curvas de viscosidad (viscosidad vs tasa de corte), del screen factor y finalmente de las curvas de viscosidad vs concentración con los objetivos particulares de evaluar la función viscosidad y la concentración final que produce la solución polimérica con la viscosidad deseada para su aplicación en campo.

4.1.5 Curvas de viscosidad VS concentración. Esta medición se relaciona con la determinación de la concentración de polímero que produce una solución polimérica con las propiedades viscosas que reducen la movilidad en el yacimiento a los valores deseados (valor de viscosidad a una tasa de corte dada). Estos valores son determinados previamente mediante análisis de yacimientos en función de las condiciones de inyección, las propiedades petrofísicas del yacimiento y las propiedades del fluido desplazante y del fluido desplazado.

Normalmente se realizan mediciones de viscosidad en función de la concentración de polímero a temperatura ambiente (30 °C) y a una tasa de corte de 7.3 s^{-1} . Estas mismas mediciones se realizan a temperatura de yacimiento y a las tasas de corte que puedan darse en el yacimiento (1 a 40 s^{-1}). El contar con esta información tiene diferentes propósitos como: permitir la comparación entre diferentes polímeros, conocer el incremento de la viscosidad con la concentración, conocer el efecto de la temperatura sobre la viscosidad y tener información de referencia para futuros monitoreos y seguimientos.

La viscosidad de las soluciones poliméricas preparadas a concentraciones de 500, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 ppm en salmuera sintética equivalente al agua de inyección, se midió a un esfuerzo de corte de 7.1 s^{-1} y a temperatura de 58.8°C (temperatura de yacimiento), usando un viscosímetro Brookfield LVT. Se grafican los resultados de viscosidad vs concentración. Esta información es útil para conocer la variación de la viscosidad con la concentración, comparar comportamientos de viscosidad entre los polímeros y como información de control para futuras aplicaciones.

4.1.6 Screen factor (SF). El Screen factor es una medida de la viscosidad elongacional de una solución de polímero, la cual está relacionada con la transición en la conformación de una molécula de polímero flexible de un estado en espiral a un estado estirado. En general, el SF es mucho más sensible que la viscosidad intrínseca (un tipo de sistema de medición alternativa) a la diferencia en el peso molecular y a la distribución de peso molecular.

Esta medición se relaciona con la naturaleza viscoelástica de las soluciones de algunos polímeros sintéticos, tales como poliacrilamidas y es más afectada por las moléculas más grandes de polímero. De acuerdo a los estudios realizados por Seright y Maeker (1981), el SF es sensible al alto peso molecular de los componentes de la muestra de polímero, atribuyendo la distribución del peso molecular a la propiedades viscoelásticas de la solución polimérica empleada (poliacrilamida) en la presencia de altas tasas de elongaciones encontradas en la convergencia y divergencia del flujo presente en el screen viscometer.

Esta medición se hace a las mismas soluciones usadas para el comportamiento reológico. Para este fin se utiliza un aparato de dos bulbos, construido de acuerdo con la recomendación API RP 63.

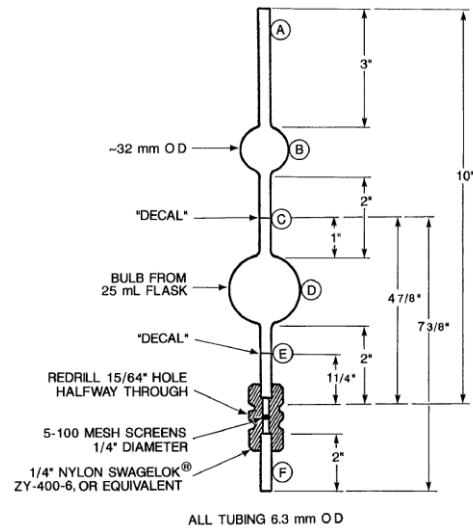


Figura 10. Representación esquemática del aparato para la medición de Screen Factor. Adaptado de (Ecopetrol, 2016)

Las mediciones se hacen a temperatura ambiente usando 5 mallas de (150 μm). Se registra el tiempo de flujo entre los bulbos para la solución polimérica, previamente filtrada a través de una malla de acero inoxidable de 325 mesh (45 μm) y para el agua de preparación (previamente filtrada por 0.45 μm). El screen factor se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$SF = \frac{ST}{STV}$$

En donde, ST y STV son los tiempos (en s), requeridos para filtrar la solución polimérica y el agua de preparación, respectivamente. Este ensayo sigue el instructivo de ensayo CLX-LQP-I-073.

4.1.7 Curvas reológicas. El comportamiento de flujo es ilustrado gráficamente por curvas de flujo y curvas de viscosidad. Las curvas de flujo muestran la interdependencia del esfuerzo de corte τ y la tasa de corte $\dot{\gamma}$. Usualmente, la tasa de corte se presenta en la abscisa (eje x) y el

esfuerzo de corte en la ordenada (eje y) y son usualmente medidas a temperatura constante. En principio, el comportamiento de flujo siempre está combinado con una resistencia al flujo, y por lo tanto con una fricción interna que ocurre entre las moléculas y partículas. Como consecuencia, es necesario que para obtener resultados precisos en presencia del fenómeno de calentamiento viscoso experimentado por la muestra, se use un dispositivo de control de temperatura, por ejemplo un baño de agua o un elemento Peltier.

Las curvas de viscosidad se derivan de las curvas de flujo, en ellas la viscosidad η se presenta en la ordenada y la tasa de corte en la abscisa.

Este ensayo tiene como objetivo determinar la viscosidad de las soluciones poliméricas en un rango de velocidades de corte y a temperatura de yacimiento.

Curvas de flujo: relacionan tasa de corte (shear rate) con esfuerzo de corte (shear stress).

Curvas de viscosidad: relacionan tasa de corte con la viscosidad aparente.

Curvas de flujo y viscosidad: Se realizan barridos de velocidad rotacional (medida).

Finalmente, se construyen las curvas reológicas de viscosidad vs velocidad de corte. Se verifica su ajuste a los modelos de Carreau y Carreau-Yasuda. A partir de la información obtenida se pueden construir las curvas de viscosidad vs concentración a una velocidad de corte constante (shear rate constante) y a temperatura de yacimiento. De esta manera se pueden comparar los polímeros entre sí y definir la concentración mínima necesaria para obtener la viscosidad requerida en yacimiento.

4.1.8 Ensayos de filtrabilidad.

4.1.8.1 Radio de filtrabilidad. Durante la preparación del polímero, en la solución pueden quedar residuos sólidos u “ojos de pescado” debido a deficiencias de hidratación los cuales influyen en la calidad la solución polimérica. Los principales factores que afectan la calidad de una solución polimérica son:

- Calidad del agua de mezcla
- Calidad del polímero
- Contaminación bacterial
- Compatibilidad con surfactante u otros químicos
- Condiciones de mezcla y corte

Estos crean dificultades en el momento de la inyección y pueden estar relacionados con deficiencias en la propagación de la solución polimérica en el medio poroso. Algunos investigadores lo usan para medir rápidamente el potencial de los polímeros de propagarse a través de un medio poroso.

La relación de filtrabilidad es una indicación de la calidad del fluido que en términos de una relación adimensional, compara el tiempo de flujo de un volumen inicial con el de un segundo volumen posterior. Si no hay taponamiento del mismo el radio de filtrabilidad no debe ser mayor de 1. Teniendo en cuenta la incertidumbre en las mediciones, se acepta hasta 1.2.

Se determinó el radio de filtrabilidad a soluciones poliméricas de concentración 1000 ppm preparadas en salmuera sintética equivalente al agua de inyección. Para este fin se utilizó un aparato de filtración, construido de acuerdo con la práctica recomendada API RP63

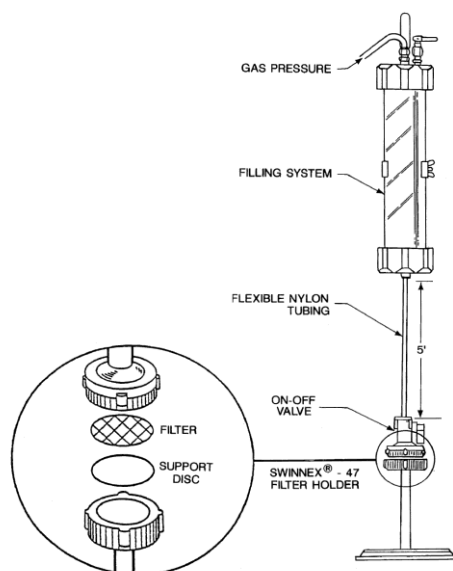


Figura 11. Representación esquemática de aparato para la medición de la relación de filtrabilidad.

Adaptado de (Ecopetrol, 2016)

Las mediciones se hacen a temperatura ambiente y una presión de 22 psi usando una membrana de nitrocelulosa de 5 μm . Se registró el tiempo de filtración acumulado para cada 50 ml de filtrado hasta completar 300 ml. El FR se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$FR = \frac{t_{300} - t_{200}}{t_{200} - t_{100}}$$

En donde, t_{300} , t_{200} y t_{100} son los tiempos (en segundos), requeridos para filtrar 100, 200 y 300 ml de la solución, respectivamente. Se espera que la solución polimérica pase a través de la membrana sin taponarla, por lo tanto la relación de filtrabilidad debe ser menor a 1.2. Este ensayo sigue el instructivo de ensayo CLX-LQP-I-072.

4.1.8.2 Filtrabilidad acumulada. Tres propiedades principales de los polímeros para recobro mejorado pueden afectar la inyektividad:

- Los residuos en el polímero
- La Reología del polímero en medios porosos

La degradación mecánica del polímero Debido a que el radio de filtrabilidad no es suficiente para predecir si un polímero se propagará adecuadamente en un medio poroso.

Investigadores como Seright y Zaitun han desarrollado ensayos para medir la tendencia de los polímeros a taponar un medio poroso. Estos ensayos han demostrado que las tendencias de taponamiento pueden variar considerablemente entre tipos de polímeros (HPAM y biopolímeros) y entre polímeros del mismo tipo.

Estos ensayos permiten ver la capacidad de dispersión del polímero en un medio poroso y prever si podría causar taponamiento al monitorear en el tiempo incrementos en el diferencial de presión (a tasa constante de inyección) o cambios en la tasa de inyección (a presión constante) cuando se inyectan volúmenes representativos a través de un medio poroso que puede ser una membrana, un empaque de arena o una roca. Los volúmenes son representativos si la relación volumen inyectado /área transversal del medio poroso es igual o mayor a $1000 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$.

Se realiza a soluciones poliméricas de 1000 ppm a temperatura ambiente. Durante el ensayo se monitorea la presión diferencial al pasar un volumen de 400 ml de solución polimérica a velocidad de flujo constante ($0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$). Este ensayo sigue el instructivo de ensayo CLX-LQP-I-085.

4.1.9 Degradación mecánica. En este ensayo, la solución polimérica es presurizada a través de un tubo capilar a diferentes caudales de flujo obtenidos al variar la presión aplicada. La velocidad de corte (sr) que sufre la solución polimérica puede ser calculada con los caudales medidos que pasan a través del capilar que tiene un radio conocido. A la solución sometida a este procedimiento se le mide Screen factor y viscosidad a 7.1 s^{-1} ambas a temperatura ambiente. Los cambios en estos dos parámetros respecto a los mismos medidos a la solución polimérica antes de someterla a cizallamiento reflejan la degradación o estabilidad mecánica del polímero. Este ensayo sigue el instructivo de ensayo CLX-LQP-I-037.

$$SR = 4Q/\pi R^3$$

Donde,

SR: velocidad de corte.

Q: caudal (cm^3/s).

R: radio del capilar (cm).

Para este fin se utilizó un aparato construido de acuerdo con la práctica recomendada API RP 63.

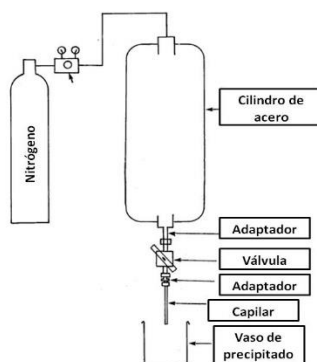


Figura 12. Representación esquemática de aparato para degradación mecánica. Adaptado de (Ecopetrol, 2016)

Análisis de resultados

Desde el año 2012 Ecopetrol ha realizado la evaluación experimental a 10 yacimientos para implementación de la inyección de polímeros, para los cuales se han valuado 82 polímeros comerciales.

En base al resultado de los ensayos realizados a los diferentes polímeros por el instituto colombiano del petróleo (ICP) y la jerarquización de los parámetros que afectan la inyección polimérica en campo que se mencionaron anteriormente (capítulo 2) se genera la tabla 3 que contempla los rangos de dificultad que enfrentará la solución polimérica para las diferentes propiedades de la roca y los fluidos del yacimiento.

Tabla 3.

Rangos de dificultad técnica que enfrentan los polímeros durante la inyección

Propiedades de la roca y los fluidos	Dificultad técnica en un proceso de inyección de polímeros
1. Temperatura	- Baja < 120°F - Moderado: 120-150°F - Alta: 150-200°F
2. Viscosidad del aceite	- Baja < 10 cp - Moderado: 10-100cp - Alta: 100-1000 cp
3. Salinidad (TDS, ppm)	- Baja < 2000 ppm - Moderado: 2000-5000 ppm - Alta: 50000 ppm
4. (Ca ²⁺ , Mg ²⁺)	- Baja < 50 ppm (sin presencia de oxígeno) - Moderado: 50-200 ppm - Alta > 200 ppm
5. Fe ²⁺ Divalente O ₂ Disuelto	- Baja: Fe²⁺ - Moderado: 0-200 - Alta: Incremento de Fe²⁺ en presencia de oxígeno
6. Permeabilidad	- Baja > 500 mD - Moderado: 100-500 mD - Alta <100mD

La metodología de análisis de resultados se plantea en base a las propiedades de yacimiento que afectan el desempeño eficiente de la solución polimérica.

Las propiedades de cada yacimiento prospecto para la inyección de polímeros se clasifican de acuerdo con la tabla 3 y se establece la dificultad técnica para cada caso, Se hace una revisión de los resultados que obtienen las diferentes soluciones poliméricas en los ensayos de laboratorio para cada aplicación del método de selección de polímeros y acorde con la literatura se establecen las propiedades optimas de que debe tener un polímero para un desempeño eficiente frente a cada propiedad y las razones por las cuales puede fallar en los diferentes ensayos; para de esta manera evitar la evaluación de polímeros que no tendrán buen desempeño.

4.2 Análisis de resultados para el campo C.

El campo C se encuentra localizado hacia la parte central del flanco occidental de la cuenca del valle medio del Magdalena. E campo se extiende aproximadamente tres mil acres sobre los departamentos de Bolívar y Santander, se divide en dos por el rio magdalena. Los intervalos de producción son depósitos delgados de la edad terciaria. Mugrosa y la paz. (Amaya, Jiménez, & Mantilla, 2015)

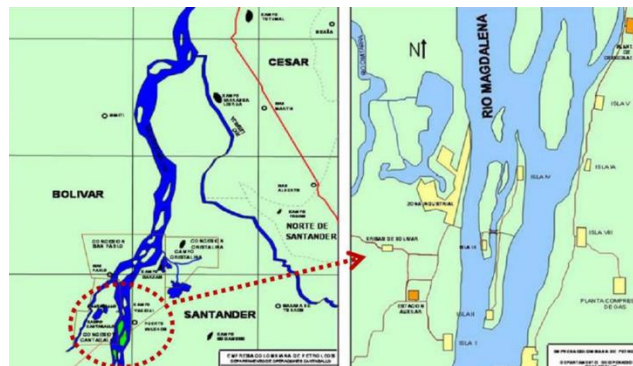


Figura 13. Campo C. Adaptado de (Amaya, Jiménez, & Mantilla, 2015)

Tabla 4.

Propiedades de la roca y los fluidos campo C.

Parámetro	Valor	Dificultad
Temperatura	138° F	Moderada
Viscosidad del aceite	24 cp	Moderada
Salinidad (TDS, ppm)	Agua fresca	Baja
(Ca ²⁺ , Mg ²⁺)	Ca ²⁺ : 225 ppm	Alta
Fe ²⁺ Divalente	NO	Baja
Permeabilidad	50- 350 mD	Moderada

En la tabla 3 se puede observar la dificultad técnica a la que se enfrentará la solución polimérica para cada propiedad

4.2.1 Análisis ensayo de reología.

Tabla 5.

Polímeros que fallaron en el ensayo de Reología

Polímero	Viscosidad a 2000 ppm	P.M ^6 D	10	% Hidrolisis	% Humedad	Composición
C-2006-15	3.8	-		25.02	13.02	Copolímero con acrilato
C-2006-16	11.9	Alto		20.10	8.85	Mezcla
C-1113-1	12.1	Medio		25.15	6.88	Copolímero con acrilato
C-0625-1	12.7	Alto		8.23	6.34	HPAM catiónica

Para superar este ensayo el polímero debe lograr una viscosidad superior a 13 cP a una concentración de 2000ppm

- Se observa que entre los polímeros que no pasaron la prueba de Reología se encuentran una similitud en la composición; ninguno de los copolímeros con acrilato obtuvo resultados positivos. El acrilato se precipita fácilmente en presencia de iones de dureza, por ejemplo, Ca²⁺.

El agua de preparación tiene alto contenido de calcio, lo cual concuerda con los resultados observados durante la Reología.

- Debido a la polaridad del agua los polímeros catiónicos no tienen buen desempeño.

4.2.2 Análisis ensayo de filtrabilidad.

Tabla 6.

Polímeros que fallaron en el ensayo de filtrabilidad

Polímero	Relación de filtrabilidad	P.M Da	10 ^6	% Hidrolisis	% Humedad	Composición
C-0220-1	1.30	Bajo		23,29	5,41	Poliacrilamida anionica
C-0220-2	1.36	Alto		24,24	7,42	Poliacrilamida anionica
C-0305-2	1.66	-		23,96	10,52	HPAM
C-0625-2	1.78	18-20		28,64	10,12	HPAM anionica Hig PM

Los polímeros con relación de filtrabilidad mayor a 1,2 no superan este ensayo.

- El mayor valor de viscosidad en la prueba de Reología lo obtuvo el polímero C-0305-2, esto nos hace inferir que el rendimiento deficiente en el ensayo de filtrabilidad se debe a que podría tratarse de un polímero de alto peso molecular, por lo que se recomienda realizar nuevamente esta prueba a una concentración menor.

4.2.3 Análisis ensayo de degradación mecánica.

Tabla 7.

Polímeros que fallaron en el ensayo de degradación mecánica.

Polímero	Degradación mecánica	P.M 10 ⁶ Da	% Hidrolisis	% Humedad	Composición
KYPAM-3S	45.8	-	29,01	10,72	HPAM
ASPIRO P4251	59.3	Alto	24,24	7,62	Poliacrilamida anicónica
EOR 980	44.1	15-19	27,87	9,44	HPAM Copolímero de ácido acrílico
POLY BEST HIGH	52.7	18-20	28,64	10,12	HPAM anicónica de alto peso molecular

Los polímeros con degradación mecánica superior al 40% son descartados

- Se observa que, de los polímeros evaluados, los polímeros de mayor peso molecular fallan en este ensayo. La frecuencia de rompimiento molecular está relacionada con el peso molecular, a mayor peso molecular, mayor rompimiento de moléculas, debido a la exposición al cizallamiento relacionado con la velocidad de corte y por ende la pérdida de viscosidad.

4.2.4 Polímeros que prometen mayor aplicación.

Tabla 8.

Polímeros que según los ensayos prometen mayor aplicación

Polímero	P.M 10 ⁶ Da	% Hidrolisis	% Humedad	Composición
C-2006-17	Medio	11,63	8,63	Mezcla
C-2116-10	9-12	31,49	9,89	HPAM-copolímero de ácido acrílico
C-2001-1	10,53	23,38	10,93	Acrilamida
C-2001-2	9,07	31,08	11,73	Acrilamida

- Para Futuras evaluaciones de polímeros se recomienda descartar polímeros que en su composición contengan acrilato.
- Los polímeros a evaluar tengan un peso molecular medio ($9-15 (* 10^6 Da)$).
- Las acrilamidas o polímeros con ácido acrílico en su composición obtuvieron buen desempeño en los ensayos realizados para este campo.

Este análisis se realiza para todos los campos evaluados por el instituto colombiano del petróleo.

4.3 Polímeros que prometen mayor aplicación.

Los polímeros sulfonatados exhiben mayor resistencia al corte. la presencia del monómero, en este caso el sulfonato (ATBS), crea una estructura mucho más resistente al corte debido a la mayor rigidez de las moléculas en solución.

5. Desarrollo de la macro

En esta etapa, se exponen los resultados obtenidos con este proyecto de grado. Se diseñó una base de datos en la que se recogen los resultados de 12 inteligencias de mercado, realizadas a 10 campos colombianos; para cada inteligencia, se registran los valores obtenidos en las diferentes pruebas realizadas a los polímeros estudiados, que finalmente son sistematizados para facilitar la visualización y comparación de dichos resultados, con el fin de agilizar el proceso de selección de polímeros, para futuros proyectos de recuperación mejorada de petróleo con polímeros.

La sistematización y compilación de la información, se realizó con la ayuda de Visual Basic para aplicaciones, contenida en la aplicación de EXCEL, guardada en el formato. xlms (libro de Excel habilitado para macros).

Visual Basic para aplicaciones es una combinación de un entorno de programación integrado denominado Editor de Visual Basic y del lenguaje de programación Visual Basic, permitiendo diseñar y desarrollar con facilidad programas en Visual Basic. El término para aplicaciones hace referencia al hecho de que el lenguaje de programación y las herramientas de desarrollo están integrados con las aplicaciones de Microsoft Office (en este caso, el Microsoft Excel), de forma que se puedan desarrollar nuevas funcionalidades y soluciones a medida, con el uso de estas aplicaciones.

El editor de Visual Basic contiene todas las herramientas de programación necesarias para escribir código en Visual Basic y crear soluciones personalizadas.

Este editor, es una ventana independiente de Microsoft Excel, pero tiene el mismo aspecto que cualquier otra ventana de una aplicación Microsoft office, y funciona igual para todas estas aplicaciones.



Se empezó a desarrollar la base de datos a partir de la clasificación de la información que existía acerca de los ensayos realizados en el instituto colombiano del petróleo.

5.1 Ventana de menú principal

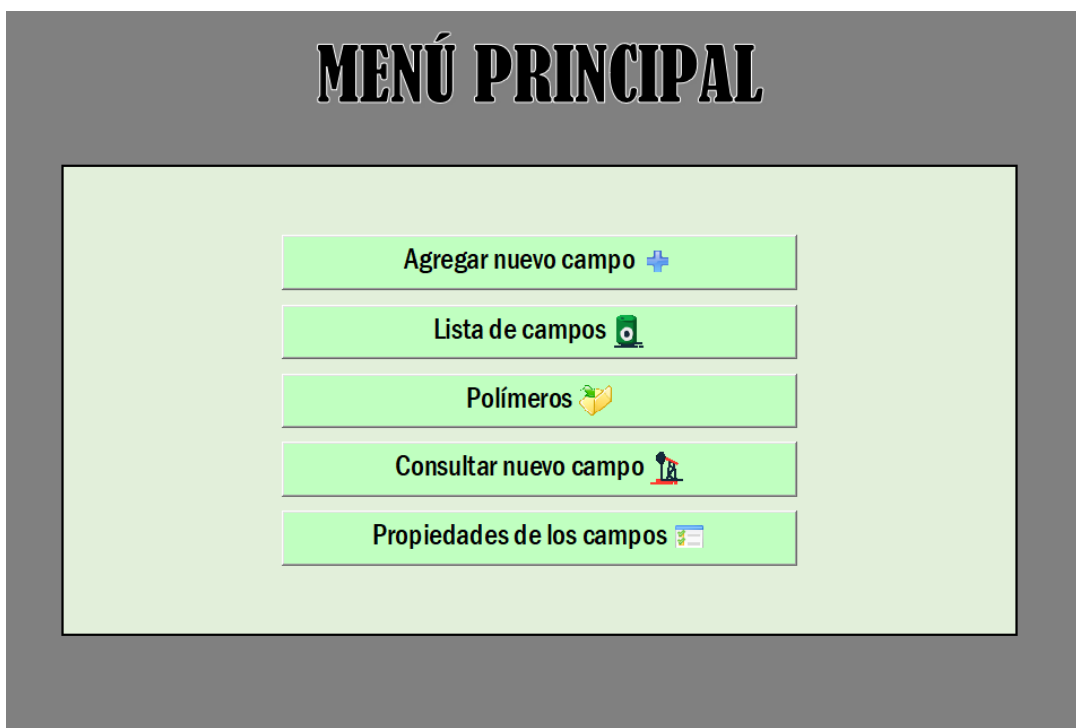


Figura 14. Ventana de menú principal

Esta ventana, denominada Menú, contiene las acciones o segmentos a los que se puede acceder en nuestra macro, se nombrarán una a una, y se describe para que sirve y que contiene.

Agregar nuevo campo: Gracias a esta opción, se podrán registrar nuevas inteligencias de mercado para campos en donde se quiera aplicar la tecnología.

Listado de campos: En ella se encuentra el listado de campos ya registrados previamente en la macro, en cada uno de ellos se encuentran los resultados de las pruebas a las cuales fueron sometidos los polímeros de cada inteligencia de mercado.

Polímeros: Presenta el listado completo de todos los polímeros estudiados en esta tesis, y su composición básica.

Propiedades de los campos: Contiene la información de los campos estudiados por el instituto colombiano del petróleo para aplicación de polímeros como método de recobro mejorado.

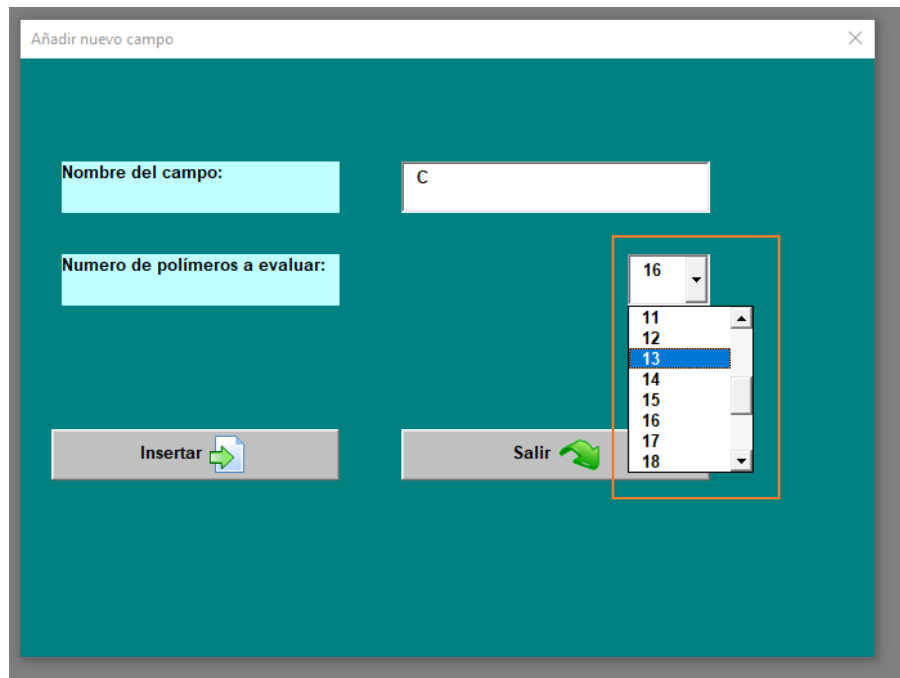
Consultar nuevo campo: Allí podremos ingresar las propiedades del campo que han sido jerarquizadas en esta tesis, y el programa hará la clasificación según los rangos que han sido planteados.

5.1.1 Agregar nuevo campo. Con el fin de crear una herramienta útil, agregamos esta sección en la cual se ahorrará el proceso tanto de registro como de programación de nuevas inteligencias de mercados en las que se apliquen polímeros.



Figura 15. Ventana de menú principal, selección del proceso de agregar nuevo campo

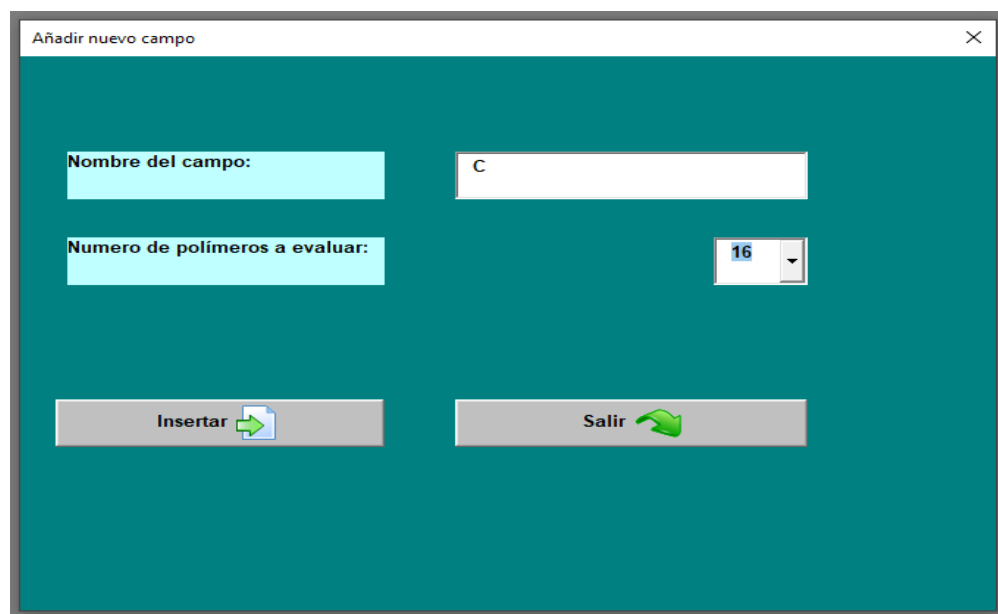
Al seleccionar la opción de agregar nuevo campo, dará acceso a un formulario en el cual debemos ingresar el nombre del campo al cual se le aplicará la inteligencia, y la cantidad de polímeros que se estudiarán en este campo.



The screenshot shows a window titled "Añadir nuevo campo" with a teal background. It contains two labels: "Nombre del campo:" and "Numero de polimeros a evaluar:". The first label is followed by a text input field containing the letter "C". The second label is followed by a dropdown menu that is open, displaying a list of numbers from 11 to 18. The number 13 is currently selected and highlighted in blue. At the bottom of the form, there are two buttons: "Insertar" with a green arrow icon pointing right, and "Salir" with a green arrow icon pointing right.

Figura 16. Formulario de registro de nuevo campo; selección de cantidad de polímeros

Como se observa en la figura anterior, podemos seleccionar la cantidad de polímeros que van a ser estudiados mediante un cuadro combinado de la lista de controles ActiveX.



The screenshot shows the same "Añadir nuevo campo" window. The dropdown menu for "Numero de polimeros a evaluar:" is now closed, and the number 16 is visible in the dropdown box. The "Insertar" button is highlighted with a green arrow icon pointing right, indicating it has been selected.

Figura 17. Formulario de registro nuevo campo; selección del botón insertar

Una vez escrito el nombre del campo y seleccionado la cantidad de polímeros, procedemos a dar sobre el botón insertar, y este ejecutará un comando, que me generará una tabla inicial de la inteligencia del campo. Cabe resaltar que el programa admite un límite máximo de 25 polímeros por inteligencia.

INTELIGENCIA DE MERCADO C							
MENU 		 Generar Hojas para las Pruebas					
COMPañIA	POLIMERO	VISCOSIDAD	SCREEN FACTOR	REOLOGÍA	RELACIÓN DE FILTRABILIDAD	DEGRADACIÓN MECÁNICA	DEGRADACIÓN TÉRMICA
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES
		ES	ES	ES	ES	ES	ES

Figura 18. Ventana principal del nuevo campo registrado

En la primera columna de esta tabla, se registrarán las compañías proveedoras de los polímeros; en la segunda columna los polímeros que serán estudiados, y en las siguientes columnas irán registradas las pruebas a las que se someten los polímeros en laboratorio.

INTELIGENCIA DE MERCADO C							
ME-NI		Generar Hojas para las Pruebas					
COMPañIA	POLIMERO	VISCOSIDAD	SCREEN FACTOR	REOLOGÍA	RELACIÓN DE FILTRABILIDAD	DEGRADACIÓN MECÁNICA	DEGRADACIÓN TÉRMICA
2006	C-2006-15	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2006	C-2006-16	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2006	C-2006-17	✓	ES	ES	ES	ES	ES
1113	C-1113-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2008	C-2008-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0220	C-0220-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0220	C-0220-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES
1721	C-1721-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2116	C-2116-10	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2116	C-2116-11	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0305	C-0305-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0305	C-0305-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0625	C-0625-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0625	C-0625-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2001	C-2001-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2001	C-2001-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES

Figura 19. Ventana principal de nuevo campo registrado; se inscriben datos de compañías y polímeros a estudiar

Una vez llenadas las dos primeras columnas, ejecutaremos el botón “Generar hojas para las pruebas”, el cual creara nuevas páginas para cada prueba, en formatos estandarizados de registro como se muestra a continuación:

A1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figura 20. Ventana de registro de resultados de prueba de viscosidad

En esta nueva ventana, se crean 4 botones que ya describiremos, y una tabla en la que aparece en la primera columna, la concentración a la cual se realizará la prueba, y en las siguientes columnas, se podrán registrar los resultados de la prueba para cada polímero.

Botón menú: Nos llevará al menú principal del programa

Botón agregar concentración: Nos agrega una nueva fila con el formato de registro

Botón grafica comparativa: Sirve para realizar graficas de la prueba que se esté realizando vs concentración

Botón Volver a página de campo: Nos devuelve a la página donde se registraron los polímeros para el campo en estudio.

Figura 21. Ventana de registro de resultados de prueba de viscosidad con los valores de los resultados obtenidos insertados.

Luego de registrar las concentraciones a las cuales se realizarán las pruebas, y el valor del resultado de la prueba para cada polímero, tendremos la facilidad de realizar graficas comparativas entre los polímeros estudiados, mediante el botón “ver gráfico comparativo”.

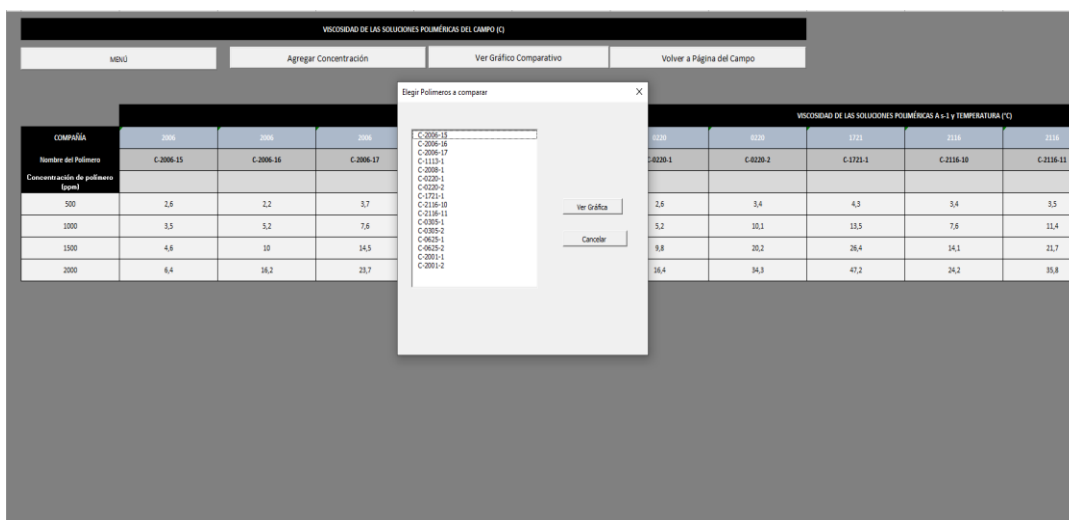


Figura 22. Selección del botón “ver gráfico comparativo”

Gracias a esta opción, se podrá seleccionar dos o más polímeros que hayan sido sometidos a las pruebas, y crear graficas comparativas entre ellos.

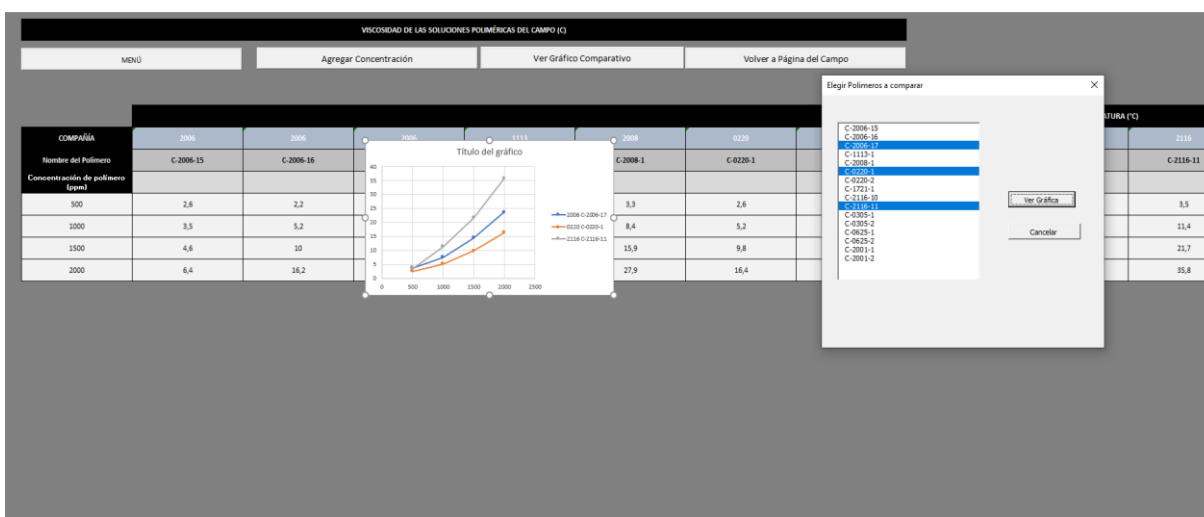


Figura 23. Gráfica comparativa entre 3 de los polímeros en estudio.

Luego de haber registrado los resultados de todas las pruebas, determinaremos cuales polímeros superaron cada prueba, y tendremos la opción de seleccionar si pasaron la prueba, si no la pasaron y otras opciones que describiremos a continuación.

INTELIGENCIA DE MERCADO C							
MENÚ		Generar Hojas para las Pruebas					
COMPAÑÍA	POLÍMERO	VISCOSIDAD	SCREEN FACTOR	REOLOGÍA	RELACIÓN DE FILTRABILIDAD	DEGRADACIÓN MECÁNICA	DEGRADACIÓN TÉRMICA
2006	C-2006-15	ES	ES	ES	ES	ES	ES
2006	C-2006-16	ES	ES	ES	ES	ES	ES
2006	C-2006-17	ES	ES	ES	ES	ES	ES
1113	C-1113-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2008	C-2008-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0220	C-0220-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0220	C-0220-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES
1721	C-1721-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2116	C-2116-10	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2116	C-2116-11	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0305	C-0305-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0305	C-0305-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0625	C-0625-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
0625	C-0625-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2001	C-2001-1	✓	ES	ES	ES	ES	ES
2001	C-2001-2	✓	ES	ES	ES	ES	ES

Figura 24. Selección del resultado final de la prueba.

En esta ventana de información, se muestran las compañías distribuidoras de los polímeros, y se muestra mediante el signo “✓”, los polímeros que superaron la prueba; con el signo “x”, los polimeros que no la superaron, y mediante el signo “-“, los polímeros que no fueron sometidos a la prueba. En las casillas en las cuales aparece “EP” se encuentran aun en el proceso de ejecución de la prueba.

Si damos click sobre cada icono, nos conduce al resultado de la prueba.

Caracterización básica de polímeros en laboratorio				
Menú				
COMPAÑÍA	POLÍMERO	POSIBLE ESTRUCTURA	%HIDROLISIS	%HUMEDAD
2006	C-2006-15			
2006	C-2006-16			
2006	C-2006-17			
1113	C-1113-1			
2008	C-2008-1			
0220	C-0220-1			
0220	C-0220-2			
1721	C-1721-1			
2116	C-2116-10			
2116	C-2116-11			
0305	C-0305-1			
0305	C-0305-2			
0625	C-0625-1			
0625	C-0625-2			
2001	C-2001-1			
2001	C-2001-2			

Figura 25. Tabla de resultados de la caracterización básica de polímeros en laboratorio.

Además de lo anteriormente mencionado, el programa registra automáticamente los polímeros estudiados, en una tabla que contiene tres columnas para consignar los datos de caracterización básica hallados en laboratorio.

5.1.2 Listado de campos

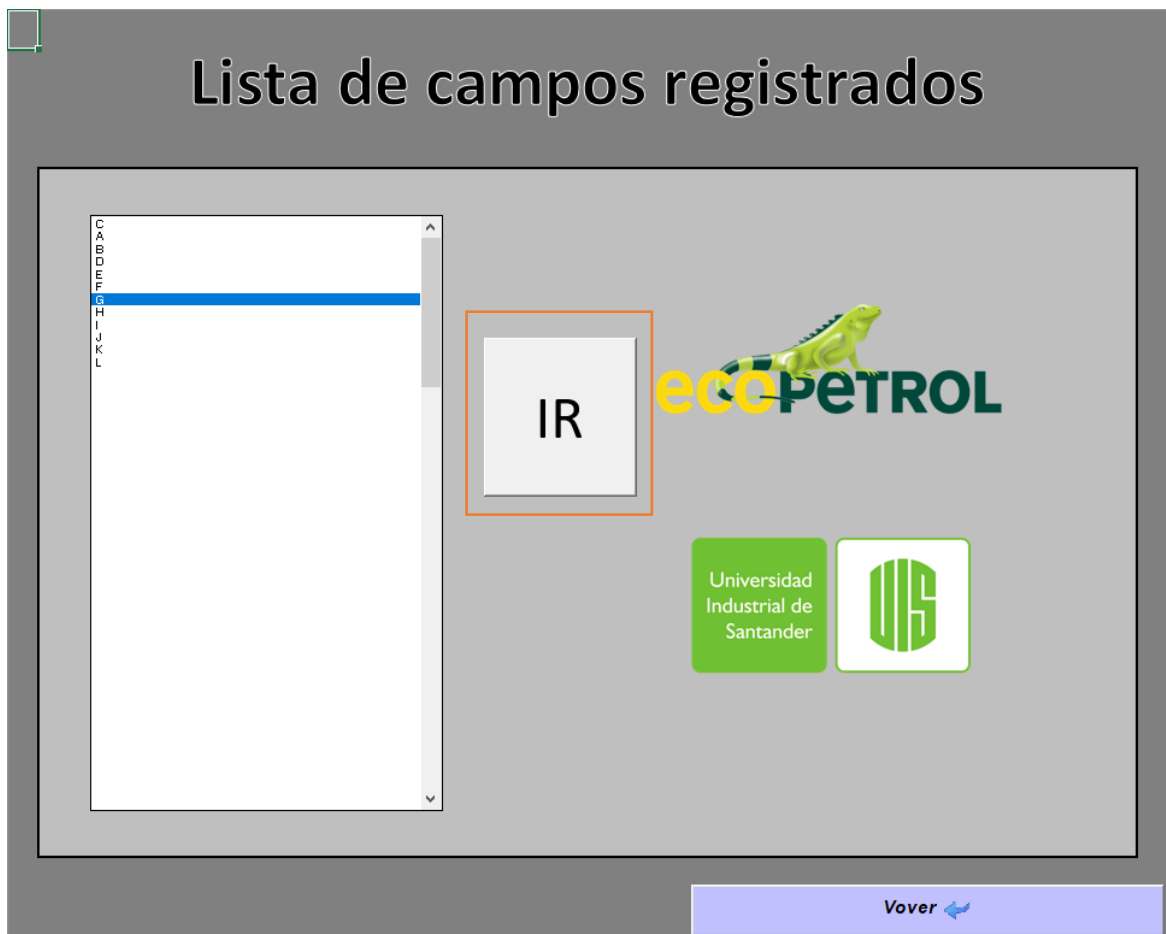


Figura 26. Lista de campos registrados.

Las inteligencias de mercado registradas anteriormente gracias al uso del botón “agregar nuevo campo” irán siendo consignadas en este listado desde el cual podremos acceder fácilmente.

Seleccionamos en el listado el campo al cual queremos acceder, y damos click sobre el botón ir.

5.1.3 Consultar nuevo campo

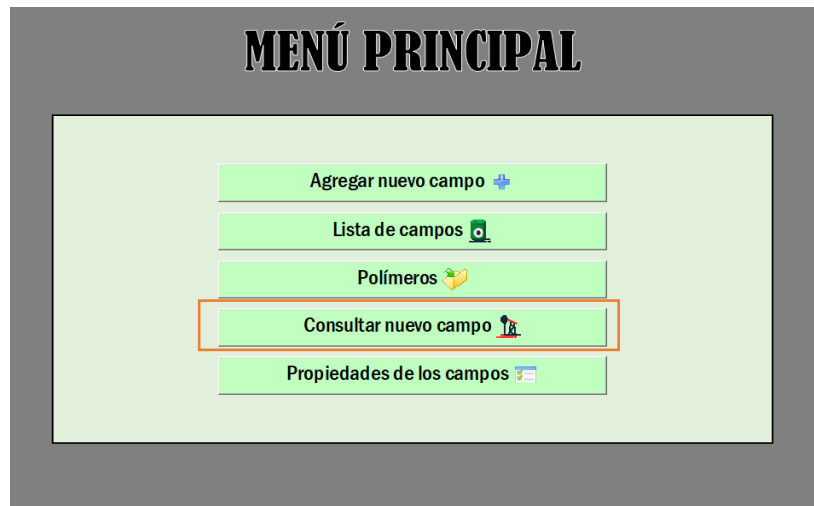


Figura 27. Ventana de menú principal, selección del botón consultar nuevo campo

Cuando el usuario ejecute el botón denominado consultar nuevo campo, este desplegará un listado de propiedades que fueron jerarquizadas en el capítulo 2 mediante un formulario programado mostrado en la siguiente imagen:

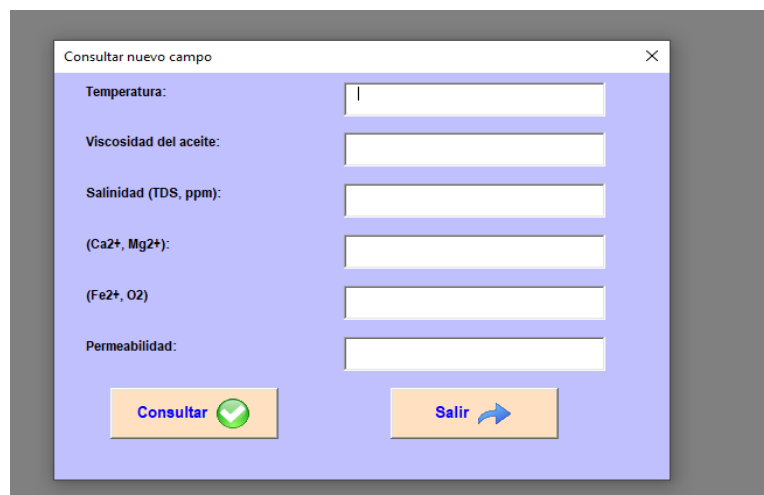


Figura 28. Formulario de consulta de nuevo campo.

El formulario contiene programados los rangos y nivel de dificultad en la aplicación de polímeros; al seleccionar el botón consultar, nos conducirá al listado de las propiedades de los campos que ya se encuentran registrados en nuestra base de datos, y nos resaltará en color amarillo, las propiedades de dichos campos que también se encuentran dentro de los rangos establecidos como se muestra en la siguiente imagen:

Propiedades de los campos									
PARÉMETRO	YARIGÜÍ	CASABE	PALOGRADE	CHICHIMENE	AKACIAS	APIAY	CASTILLA	RUBIALES	SURIA
litología	Arenisca	Arenisca	Arenisca	Arenisca	ARENISCA	ARENISCA	ARENISCA	ARENISCA	ARENISCA
Temperatura yacimiento (°F)	138	116	143	185-210	219,2	250	195	136	210-215
API	21	19,35-21	20-22	8	8-9	13,9-15,7	12,4-13,8	12-13	11-12
Porosidad, %	prom 19	prom 24	prom 18,5	prom 19	prom 19	Prom 12	prom 18	prom 30	Prom 15%
Permeabilidad, mD	50-350 (prom, 105)	5-1000(prom 150)	6-150 (prom 78)	100-5000	2000-10000 (prom 2500)	50-1500 (prom 120)	200-2000 (prom 800)	1000-20000 (prom 5000)	50-1500 (prom 200)
Viscosidad aceite, cP (a Pb y Ty)	24	37	9,4	350-700	250-400	8,5-10	140	160-730	82-103
Agua de preparación	Fresca	Fresca	Producción/fresca	Producción					
Salinidad (TDS, ppm)	14822	11513	6964,3	1944	359	778	2322	1017	1198,3
(Ca ²⁺ , Mg ²⁺)									
Fe ²⁺ Divalente, O2 Disuelto	1,5	5	3	2,8	0,2	1,1	0,8	1,5	0,5
Cloruros, mg/L	<10	<10	4500<100	2000	217	279	155	140	680
Presencia de hierro	NO	NO	SI (agua de producción)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Presencia de grasas y aceites	NO	NO	SI (agua de producción)	SI					
Profundidad	6744	3035	5000		9848	9500-10000	5000	2800	9500-10000

Consultar nuevo campo
Volver

Figura 29. Consulta de propiedades de campos que se encuentran dentro de rangos establecidos.

5.1.4 Propiedades de los campos

Propiedades de los campos										
PARÉMETRO	CAMPO B	CAMPO L	CAMPO D	CAMPO A	CAMPO F	CAMPO G	CAMPO H	CAMPO I	CAMPO J	CAMPO K
litología	Arenisca	Arenisca	Arenisca	Arenisca	ARENISCA	ARENISCA	ARENISCA	ARENISCA	ARENISCA	
temperatura yacimiento (°F)	138	116	143	185-210	104 °C	250	195	136	210-215	46°C
API	21	19,35-21	20-22	8	8-9	13,9-15,7	12,4-13,8	12-13	11-12	22-25
Porosidad, %	prom 19	prom 24	prom 18,5	prom 19	prom 19	Prom 12	prom 18	prom 30	Prom 15%	
Permeabilidad, mD	50-350 (prom, 105)	5-1000(prom 150)	6-150 (prom 78)	100-5000	2000-10000 (prom 2500)	50-1500 (Prom 120)	200-2000 (prom 800)	1000-20000 (prom 5000)	50-1500 (prom 200)	
Viscosidad aceite, cP (a Pb y Ty)	24	37	9,4	350-700	250-400	8,5-10	140	160-730 a 62 °C	82-103	15-20
Agua de preparación	Fresca	Fresca	Producción/fresca	Producción						
Cloruros, mg/L	<10	<10	4500<100	2000	217	279	155	140	680	15,7
Presencia de hierro	NO	NO	SI (agua de producción)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Presencia de grasas y aceites	NO	NO	SI (agua de producción)	SI						
Profundidad	6744	3035	5000		9848	9500-10000	5000	2800	9500-10000	

Figura 26. Tabla de propiedades de los campos.

Muestra los datos de los campos que en esta tesis fueron seleccionados como los más relevantes en el proceso de selección de polímeros, gracias a ellos se hace la clasificación y comparación de estos datos para el uso en inteligencias futuras.

Caracterización básica de polímeros en laboratorio

Menú

COMPañía	POLÍMERO	POSIBLE ESTRUCTURA	%HIDROLISIS	%HUMEDAD
2006	C-2006-15			
2006	C-2006-16			
2006	C-2006-17			
1113	C-1113-1			
2008	C-2008-1			
0220	C-0220-1			
0220	C-0220-2			
1721	C-1721-1			
2116	C-2116-10			
2116	C-2116-11			
0305	C-0305-1			
0305	C-0305-2			
0625	C-0625-1			
0625	C-0625-2			
2001	C-2001-1			
2001	C-2001-2			

Figura 26. Lista de propiedades básicas de los polímeros.

5.1.5 Polímeros. Con este botón podemos acceder a la información de la caracterización básica de cada polímero registrado en el programa como lo son su posible estructura, % hidrolisis y % de humedad.

5.1.6 Descripción de la macro. La macro que se presenta en este trabajo de grado tiene como fin lograr optimizar la selección de polímeros en futuras inteligencias, estableciendo rangos de aplicabilidad para cada parámetro del yacimiento que afectará la solución polimérica, de esta forma lograr establecer las propiedades de los polímeros que se desempeñan mejor frente a cada parámetro. Durante las inteligencias de mercado que ha realizado el instituto colombiano del petróleo se han tenido que evaluar todos los polímeros comerciales que han presentado las

empresas, con esta herramienta se busca descartar todos aquellos polímeros que por sus propiedades no tendrán buen desempeño ante las propiedades del yacimiento a las que se enfrentaran, de esta manera minimizar costos y tiempo de evaluación.

5.2 Codificación de Componentes

5.2.1 Codificación botón Agregar nuevo campo

```
Private Sub btninsertar_Click()
```

```
Load frmcampos
```

```
frmcampos.Show
```

```
End Sub
```

5.2.2 Codificación botón insertar

```
Private Sub CommandButtonInsertar_Click()
```

```
Dim Titulo As String
```

```
Dim NumeroPolimeros, NumeroPruebas As Integer
```

```
Titulo = UCase(frmcampos.TextBoxNombreCampo.Value)
```

```
If (Titulo = "" Or frmcampos.ComboBoxNumeroPolimeros.Value = "") Then
```

```
    MsgBox "No ha introducido valores adecuados para proceder a la creación del Campo!!!"
```

```
Else
```

```
    Sheets("PLANTILLACAMPO").Select
```

```
Worksheets("PLANTILLACAMPO").Copy After:=Sheets(Sheets.Count)

ActiveSheet.Name = Titulo

Range("B2").Value = "INTELIGENCIA DE MERCADO " + Titulo

NumeroPolimeros = Val(frmcampos.ComboBoxNumeroPolimeros.Value)

Range("XFD8").Value = NumeroPolimeros

NumeroPruebas = 6


Dim rangoCampo As Range

Set rangoCampo = Range("B9", "B9")


Set rangoCampo = Range(rangoCampo.Cells(1, 1), rangoCampo.Offset(NumeroPolimeros -
1, NumeroPruebas + 1).Cells(1, 1))

rangoCampo.Select

With Selection.Interior

    .Pattern = xlSolid

    .PatternColorIndex = xlAutomatic

    .ThemeColor = xlThemeColorDark1

    .TintAndShade = 0

    .PatternTintAndShade = 0

End With

Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone

Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone

With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeTop)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlEdgeRight)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideVertical)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
With Selection.Borders(xlInsideHorizontal)
```

```
.LineStyle = xlContinuous
```

```
.ColorIndex = 0
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.Weight = xlThin
```

```
End With
```

```
Set rangoCampo = Range(rangoCampo.Cells(1, 1), rangoCampo.Offset(NumeroPolimeros -  
1, 0).Cells(1, 1))
```

```
rangoCampo.Select
```

```
With Selection.Interior
```

```
.Pattern = xlSolid
```

```
.PatternColorIndex = xlAutomatic
```

```
.ThemeColor = xlThemeColorAccent1
```

```
.TintAndShade = 0
```

```
.PatternTintAndShade = 0
```

```
End With
```

```
rangoCampo.Offset(0, 1).Select
```

```
With Selection.Interior
```

```
.Pattern = xlSolid
```

```
.PatternColorIndex = xlAutomatic
```

```
.ThemeColor = xlThemeColorDark2
```

```
.TintAndShade = -9.99786370433668E-02
```

```
.PatternTintAndShade = 0
```

```
End With
```

```
If NumeroPolimeros > 1 Then
```

```
Range("D9:I9").Select
```

```
Application.CutCopyMode = False
```

```
Selection.Copy
```

```
Set rangoCampo = Range("D10")
```

```
Set rangoCampo = Range(rangoCampo.Cells(1, 1),
```

```
rangoCampo.Offset(NumeroPolimeros - 2, NumeroPruebas - 1))
```

```
rangoCampo.Select
```

```
ActiveSheet.Paste
```

```
End If
```

```
'ACTUALIZAR LISTA DE CAMPOS AGREGADOS
```

```
Dim totalCampos As Integer
```

```
totalCampos = Sheets("CAMPOS").Range("XFD5").Value
```

```
Sheets("CAMPOS").Range("XFD5").Value = totalCampos + 1

If totalCampos = 0 Then

    Sheets("CAMPOS").Range("XFD6").Value =
UCase(frmcampos.TextBoxNombreCampo.Value)

Else

    Sheets("CAMPOS").Range("XFD6").Offset(totalCampos, 0).Value =
UCase(frmcampos.TextBoxNombreCampo.Value)

End If

End If

End Sub
```

5.2.3 Codificación botón salir

```
Private Sub CommandButton2_Click()

    frmcampos.Hide

End Sub
```

Codificación boton Listado de campos

```
Private Sub btnListaCampos_Click()

    Sheets("CAMPOS").Select

End Sub
```

5.2.4 Codificación botón polímeros

```
Private Sub btnpolimeros_Click()  
Sheets("POLIMEROS").Select  
End Sub
```

5.2.5 Codificación botón propiedades de los campos

```
Private Sub btnPropiedades_Click()  
Sheets("PROPIEDADESCAMPOS").Select  
End Sub
```

5.2.6 Codificación botón consultar nuevo campo

```
Private Sub btnconsultar_Click()  
Load frmconsultacampos  
frmconsultacampos.Show  
End Sub
```

5.2.7 Codificación boton consultar

```
Private Sub btnconsultar_Click()  
Dim MinRef, MaxRef, MinValor, MaxValor, ValorNumerico As Double
```

```
Dim ValorTexto As String

Dim posicion, i As Integer

Dim sombrear As Boolean

Dim rangoTrabajo As Range

Sheets("PROPIEDADESCAMPOS").Select

'REVISAR TEMPERATURA

If frmconsultacampos.TextBoxTemperatura.Value <> "" Then

    Set rangoTrabajo = Range("B6")

    posicion =

Application.WorksheetFunction.HLookup(CDbl(frmconsultacampos.TextBoxTemperatura.Value), Range("q4:s5"), 2, True)

    frmconsultacampos.EtiquetaTemperatura.Caption = Range("V3").Offset(0, posicion + 1).Value

    MinRef = Range("P4").Offset(0, posicion + 1).Value

    MaxRef = Range("P4").Offset(0, posicion + 2).Value

    For i = 1 To 10

        sombrear = False

        rangoTrabajo.Offset(0, i).Select

        If IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

            ValorNumerico = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

        Else

            ValorTexto = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

        End If

    End For
```

```
        If Not IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

            If (InStr(ValorTexto, "prom") > 0) Then

                ValorTexto = LimpiarPromedio(ValorTexto)

            End If

            MinValor = minimo(ValorTexto)

            MaxValor = maximo(ValorTexto)

            If (MinRef <= MinValor And MaxRef > MinValor) Or (MinRef <= MaxValor And
MaxRef > MaxValor) Then

                sombrear = True

            End If

        Else

            If MinRef <= ValorNumerico And MaxRef > ValorNumerico Then

                sombrear = True

            End If

        End If

        If sombrear And rangoTrabajo.Offset(0, i).Value <> "" Then

            With Selection.Interior

                .Pattern = xlSolid

                .PatternColorIndex = xlAutomatic

                .Color = 65535

                .TintAndShade = 0

                .PatternTintAndShade = 0

            End With
```

```
End If

Next

End If

'REVISAR PERMEABILIDAD

If frmconsultacampos.TextBoxPermeabilidad.Value <> "" Then

    posicion =

Application.WorksheetFunction.HLookup(CDbl(frmconsultacampos.TextBoxPermeabilidad.Val
ue), Range("q14:s15"), 2, True)

    frmconsultacampos.EtiquetaPermeabilidad.Caption = Range("V3").Offset(0, posicion +
1).Value

    MinRef = Range("P14").Offset(0, posicion + 1).Value
    MaxRef = Range("P14").Offset(0, posicion + 2).Value


Set rangoTrabajo = Range("B9")

For i = 1 To 10

    sombrear = False

    rangoTrabajo.Offset(0, i).Select

    If IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

        ValorNumerico = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

    Else

        ValorTexto = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

    End If
```

```
If Not IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then
    If (InStr(ValorTexto, "prom") > 0) Then
        ValorTexto = LimpiarPromedio(ValorTexto)
    End If
    MinValor = minimo(ValorTexto)
    MaxValor = maximo(ValorTexto)
    If (MinRef <= MinValor And MaxRef > MinValor) Or (MinRef <= MaxValor And
MaxRef > MaxValor) Then
        sombrear = True
    End If
Else
    If MinRef <= ValorNumerico And MaxRef > ValorNumerico Then
        sombrear = True
    End If
End If
If sombrear And rangoTrabajo.Offset(0, i).Value <> "" Then
    With Selection.Interior
        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
        .Color = 65535
        .TintAndShade = 0
        .PatternTintAndShade = 0
    End With
```

```
End If

Next

End If

'REVISAR VISCOSIDAD

If frmconsultacampos.TextBoxViscosidad.Value <> "" Then

    posicion =

Application.WorksheetFunction.HLookup(CDbl(frmconsultacampos.TextBoxViscosidad.Value)

, Range("q6:s7"), 2, True)

    frmconsultacampos.EtiquetaViscosidad.Caption = Range("V3").Offset(0, posicion +

1).Value

    MinRef = Range("P6").Offset(0, posicion + 1).Value

    MaxRef = Range("P6").Offset(0, posicion + 2).Value

    Set rangoTrabajo = Range("B10")

    For i = 1 To 10

        sombrear = False

        rangoTrabajo.Offset(0, i).Select

        If IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

            ValorNumerico = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

        Else

            ValorTexto = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

        End If

    Next i

    If Not IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then
```

```
If (InStr(ValorTexto, "prom") > 0) Then
    ValorTexto = LimpiarPromedio(ValorTexto)
End If

MinValor = minimo(ValorTexto)
MaxValor = maximo(ValorTexto)

If (MinRef <= MinValor And MaxRef > MinValor) Or (MinRef <= MaxValor And
MaxRef > MaxValor) Then
    sombrear = True
End If
Else
    If MinRef <= ValorNumerico And MaxRef > ValorNumerico Then
        sombrear = True
    End If
End If

If sombrear And rangoTrabajo.Offset(0, i).Value <> "" Then
    With Selection.Interior
        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
        .Color = 65535
        .TintAndShade = 0
        .PatternTintAndShade = 0
    End With
End If
```

```
Next
End If

'REVISAR SALINIDAD

If frmconsultacampos.TextBoxSalinidad.Value <> "" Then

    posicion =

Application.WorksheetFunction.HLookup(CDbl(frmconsultacampos.TextBoxSalinidad.Value),
Range("q8:s9"), 2, True)

    frmconsultacampos.EtiquetaSalinidad.Caption = Range("V3").Offset(0, posicion + 1).Value

    MinRef = Range("P8").Offset(0, posicion + 1).Value

    MaxRef = Range("P8").Offset(0, posicion + 2).Value

    Set rangoTrabajo = Range("B12")

    For i = 1 To 10

        sombrear = False

        rangoTrabajo.Offset(0, i).Select

        If IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

            ValorNumerico = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

        Else

            ValorTexto = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

        End If

        If Not IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

            If (InStr(ValorTexto, "prom") > 0) Then

                ValorTexto = LimpiarPromedio(ValorTexto)
```

```
End If

MinValor = minimo(ValorTexto)

MaxValor = maximo(ValorTexto)

If (MinRef <= MinValor And MaxRef > MinValor) Or (MinRef <= MaxValor And
MaxRef > MaxValor) Then

    sombrear = True

End If

Else

    If MinRef <= ValorNumerico And MaxRef > ValorNumerico Then

        sombrear = True

    End If

End If

If sombrear And rangoTrabajo.Offset(0, i).Value <> "" Then

    With Selection.Interior

        .Pattern = xlSolid

        .PatternColorIndex = xlAutomatic

        .Color = 65535

        .TintAndShade = 0

        .PatternTintAndShade = 0

    End With

End If

Next

End If
```

'REVISAR CALCIO

If frmconsultacampos.TextBoxCalcio.Value <> "" Then

 posicion =

 Application.WorksheetFunction.HLookup(CDbl(frmconsultacampos.TextBoxCalcio.Value),
 Range("q10:s11"), 2, True)

 frmconsultacampos.EtiquetaCalcio.Caption = Range("V3").Offset(0, posicion + 1).Value

 MinRef = Range("P10").Offset(0, posicion + 1).Value

 MaxRef = Range("P10").Offset(0, posicion + 2).Value

 Set rangoTrabajo = Range("B13")

 For i = 1 To 10

 sombrear = False

 rangoTrabajo.Offset(0, i).Select

 If IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

 ValorNumerico = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

 Else

 ValorTexto = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value

 End If

 If Not IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then

 If (InStr(ValorTexto, "prom") > 0) Then

 ValorTexto = LimpiarPromedio(ValorTexto)

 End If

 MinValor = minimo(ValorTexto)

```
MaxValor = maximo(ValorTexto)

If (MinRef <= MinValor And MaxRef > MinValor) Or (MinRef <= MaxValor And
MaxRef > MaxValor) Then

    sombrear = True

End If

Else

    If MinRef <= ValorNumerico And MaxRef > ValorNumerico Then

        sombrear = True

    End If

End If

If sombrear And rangoTrabajo.Offset(0, i).Value <> "" Then

    With Selection.Interior

        .Pattern = xlSolid

        .PatternColorIndex = xlAutomatic

        .Color = 65535

        .TintAndShade = 0

        .PatternTintAndShade = 0

    End With

End If

Next

End If

'REVISAR HIERRO

If frmconsultacampos.TextBoxHierro.Value <> "" Then
```

```
posicion =  
Application.WorksheetFunction.HLookup(CDbl(frmconsultacampos.TextBoxHierro.Value),  
Range("q12:s13"), 2, True)  
  
frmconsultacampos.EtiquetaHierro.Caption = Range("V3").Offset(0, posicion + 1).Value  
  
MinRef = Range("P12").Offset(0, posicion + 1).Value  
  
MaxRef = Range("P12").Offset(0, posicion + 2).Value  
  
Set rangoTrabajo = Range("B14")  
  
For i = 1 To 10  
  
    sombrear = False  
  
    rangoTrabajo.Offset(0, i).Select  
  
    If IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then  
  
        ValorNumerico = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value  
  
    Else  
  
        ValorTexto = rangoTrabajo.Offset(0, i).Value  
  
    End If  
  
  
    If Not IsNumeric(rangoTrabajo.Offset(0, i).Value) Then  
  
        If (InStr(ValorTexto, "prom") > 0) Then  
  
            ValorTexto = LimpiarPromedio(ValorTexto)  
  
        End If  
  
        MinValor = minimo(ValorTexto)  
  
        MaxValor = maximo(ValorTexto)
```

```
If (MinRef <= MinValor And MaxRef > MinValor) Or (MinRef <= MaxValor And
MaxRef > MaxValor) Then
    sombrear = True
End If
Else
    If MinRef <= ValorNumerico And MaxRef > ValorNumerico Then
        sombrear = True
    End If
End If
If sombrear And rangoTrabajo.Offset(0, i).Value <> "" Then
    With Selection.Interior
        .Pattern = xlSolid
        .PatternColorIndex = xlAutomatic
        .Color = 65535
        .TintAndShade = 0
        .PatternTintAndShade = 0
    End With
End If
Next
End If
End Sub
```

5.2.8 Codificación botón Generar hojas para las pruebas

```
Private Sub CommandButtonGenerarHojasPruebas_Click()

    Application.Goto Reference:="R9C2"

    Dim rangoTrabajo1, rangoControl As Range

    Dim Titulo1, HojaHiperVinculo, aux, aux2 As String

    Set rangoTrabajo1 = Selection

    Dim filas, i, filasPolimeros As Integer

    filas = 0

    Do While (rangoTrabajo1.Value <> "")

        filas = filas + 1

        Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)

    Loop

    If (filas = 0) Then

        MsgBox "Debe ingresar todas las compañías para proceder!!!"

    Else

        Set rangoTrabajo1 = Range("B9")

        Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Resize(filas, 2)

        If rangoTrabajo1.Cells.Count / 2 > 1000 Then

            MsgBox "No se puede generar Hojas para las Pruebas!!!"

        Else

            Titulo1 = ActiveSheet.Name
```

Call AgregarHojaPrueba(Titulo1, "VISCOSIDAD", filas, " A s-1 y TEMPERATURA (°C)")

Call AgregarHojaPrueba(Titulo1, "SCREENFACTOR", filas, "A TEMPERATURA (°C)")

Call AgregarHojaPrueba(Titulo1, "REOLOGIA", filas, "")

Call AgregarHojaPruebaFiltrabilidad(Titulo1, "FILTRABILIDAD", filas)

Call AgregarHojaPruebaMecanica(Titulo1, "DEGRAMECANICA", filas, "")

Call AgregarHojaPrueba(Titulo1, "DEGRATERMICA", filas, "")

End If

Sheets(Titulo1).Select

'COLOCAR HIPERVINCULOS

filas = Sheets(Titulo1).Range("XFD8").Value

Set rangoTrabajo1 = Sheets(Titulo1).Range("D9")

HojaHiperVinculo = Titulo1 + "VISCOSIDAD!"

For i = 1 To filas

 rangoTrabajo1.Select

 aux = ColumnaLetra(i) + "12"

 aux = HojaHiperVinculo + aux + ":" + Range(aux).End(xlDown).Address

 ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _

 aux, TextToDisplay:=rangoTrabajo1.Value

Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)

Next

Set rangoTrabajo1 = Sheets(Titulo1).Range("E9")

HojaHiperVinculo = Titulo1 + "SCREENFACTOR!"

For i = 1 To filas

 rangoTrabajo1.Select

 aux = ColumnaLetra(i) + "12"

 aux = HojaHiperVinculo + aux + ":" + Range(aux).End(xlDown).Address

 ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _

 aux, TextToDisplay:=rangoTrabajo1.Value

 Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)

Next

Set rangoTrabajo1 = Sheets(Titulo1).Range("F9")

HojaHiperVinculo = Titulo1 + "REOLOGIA!"

For i = 1 To filas

 rangoTrabajo1.Select

 aux = ColumnaLetra(i) + "12"

 aux = HojaHiperVinculo + aux + ":" + Range(aux).End(xlDown).Address

 ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _

 aux, TextToDisplay:=rangoTrabajo1.Value

 Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)

Next

Set rangoTrabajo1 = Sheets(Titulo1).Range("G9")

HojaHiperVinculo = Titulo1 + "FILTRABILIDAD!"

```
For i = 1 To filas
    rangoTrabajo1.Select
    aux = "C" + CStr(8 + i)
    aux = HojaHiperVinculo + Range(aux).Resize(1, 3).Address
    ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
        aux, TextToDisplay:=rangoTrabajo1.Value
    Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)
Next

Set rangoTrabajo1 = Sheets(Titulo1).Range("H9")
HojaHiperVinculo = Titulo1 + "DEGRAMECANICA!"
aux2 = Titulo1 + "DEGRAMECANICA"
Set rangoControl = Sheets(aux2).Range("B8:G16")
aux = HojaHiperVinculo + rangoControl.Address

For i = 1 To filas
    rangoTrabajo1.Select
    ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
        aux, TextToDisplay:=rangoTrabajo1.Value
    Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)
    Set rangoControl = rangoControl.Offset(0, 7)
    aux = HojaHiperVinculo + rangoControl.Address
Next

Set rangoTrabajo1 = Sheets(Titulo1).Range("I9")
HojaHiperVinculo = Titulo1 + "DEGRATERMICA!"
```

```
For i = 1 To filas
```

```
    rangoTrabajo1.Select
```

```
    aux = ColumnaLetra(i) + "12"
```

```
    aux = HojaHiperVinculo + aux + ":" + Range(aux).End(xlDown).Address
```

```
    ActiveSheet.Hyperlinks.Add Anchor:=Selection, Address:="", SubAddress:= _
```

```
        aux, TextToDisplay:=rangoTrabajo1.Value
```

```
    Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0)
```

```
Next
```

```
Sheets("POLIMEROS").Select
```

```
filasPolimeros = Sheets("POLIMEROS").Range("XFD6").Value
```

```
Set rangoTrabajo1 = Sheets("POLIMEROS").Range("B6").Offset(filasPolimeros + 1, 0)
```

```
Set rangoControl = Sheets("POLIMEROS").Range("P1:T2")
```

```
filasPolimeros = filasPolimeros + filas + 1
```

```
Sheets("POLIMEROS").Range("XFD6").Value = filasPolimeros
```

```
rangoControl.Copy
```

```
rangoTrabajo1.Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteAll, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
```

```
Transpose:=False
```

```
rangoTrabajo1.Value = Titulo1
```

```
Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Offset(1, 0).Resize(1, 5)
```

```
Set rangoControl = rangoTrabajo1.Resize(filas, 5)
```

```
rangoTrabajo1.Copy
```

```
rangoControl.Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteAll, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=False

Set rangoTrabajo1 = rangoTrabajo1.Resize(filas, 2)

Set rangoControl = Sheets(Titulo1).Range("B9")

Set rangoControl = rangoControl.Resize(filas, 2)

rangoControl.Copy

rangoTrabajo1.Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=False

End If

End Sub

Sub AgregarHojaPrueba(TituloCampo, TituloHojaPrueba, filas, Unidades)

Dim Titulo2, TituloConEspacios As String

Dim columnas As Integer

Dim rangoTrabajo As Range

Sheets("PLANTILLAPRUEBAS").Select

Application.ActiveSheet.Copy After:=Sheets(Sheets.Count)

Titulo2 = TituloCampo + TituloHojaPrueba

ActiveSheet.Name = Titulo2

TituloConEspacios = TituloHojaPrueba
```

Select Case TituloHojaPrueba

Case "FILTRABILIDAD"

TituloConEspacios = "RELACION DE FILTRABILIDAD"

Case "DEGRAMECANICA"

TituloConEspacios = "DEGRADACIÓN MECANICA"

Case "DEGRATERMICA"

TituloConEspacios = "DEGRADACIÓN TÉRMICA"

End Select

ActiveSheet.Range("B2").Value = TituloConEspacios + " DE LAS SOLUCIONES
POLIMÉRICAS DEL CAMPO (" + UCase(TituloCampo) + ")"

ActiveSheet.Range("C8").Value = TituloConEspacios + " DE LAS SOLUCIONES
POLIMÉRICAS" + Unidades

Sheets(TituloCampo).Select

Set rangoTrabajo = Sheets(TituloCampo).Range("B9")

Set rangoTrabajo = rangoTrabajo.Resize(filas, 2)

rangoTrabajo.Select

Selection.Copy

Sheets(Titulo2).Select

Application.Goto Reference:="R9C3"

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=True

columnas = Selection.Columns.Count

Sheets(Titulo2).Range("XFD6").Value = columnas

```
Application.Goto Reference:="R8C3"

Set rangoTrabajo = Selection.Resize(1, columnas)

rangoTrabajo.Select

Selection.UnMerge

Selection.Merge

Application.Goto Reference:="R9C3"

Set rangoTrabajo = Selection.Resize(4, 1)

rangoTrabajo.Select

Selection.Copy

Set rangoTrabajo = Selection.Resize(4, columnas)

rangoTrabajo.Select

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteFormats, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=False

Application.Goto Reference:="R8C3"

End Sub


Sub AgregarHojaPruebaFiltrabilidad(TituloCampo, TituloHojaPrueba, filas)

Dim Titulo2, TituloConEspacios As String

Dim rangoTrabajo As Range


Sheets("PLANTILLAFILTRABILIDAD").Select

Application.ActiveSheet.Copy After:=Sheets(Sheets.Count)

Titulo2 = TituloCampo + TituloHojaPrueba
```

```
ActiveSheet.Name = Titulo2

TituloConEspacios = TituloHojaPrueba

Select Case TituloHojaPrueba

    Case "FILTRABILIDAD"

        TituloConEspacios = "RELACION DE FILTRABILIDAD"

    Case "DEGRAMECANICA"

        TituloConEspacios = "DEGRADACIÓN MECANICA"

    Case "DEGRATERMICA"

        TituloConEspacios = "DEGRADACIÓN TÉRMICA"

End Select

Sheets(Titulo2).Range("B2").Value = TituloConEspacios + " DE LAS SOLUCIONES
POLIMÉRICAS DEL CAMPO (" + UCase(TituloCampo) + ")"

Sheets(TituloCampo).Select

Set rangoTrabajo = Sheets(TituloCampo).Range("B9")

Set rangoTrabajo = rangoTrabajo.Resize(filas, 2)

rangoTrabajo.Select

Selection.Copy

Sheets(Titulo2).Select

Application.Goto Reference:="R9C2"

Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
Transpose:=False
```

```
Sheets(Titulo2).Range("XFD6").Value = filas
```

```
Application.Goto Reference:="R9C2"
```

```
Set rangoTrabajo = Selection.Resize(1, 4)
```

```
rangoTrabajo.Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Set rangoTrabajo = Selection.Resize(filas, 4)
```

```
rangoTrabajo.Select
```

```
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteFormats, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False,
```

```
Transpose:=False
```

```
Application.Goto Reference:="R9C3"
```

```
End Sub
```

```
Sub AgregarHojaPruebaMecanica(TituloCampo, TituloHojaPrueba, filas, Unidades)
```

```
Dim Titulo2, TituloConEspacios As String
```

```
Dim columnas, i As Integer
```

```
Dim rangoTrabajo, rangoACopiar, rangoDestino As Range
```

```
Sheets("PLANTILLAMECANICA").Select
```

```
Application.ActiveSheet.Copy After:=Sheets(Sheets.Count)
```

```
Titulo2 = TituloCampo + TituloHojaPrueba
```

```
ActiveSheet.Name = Titulo2
```

```
TituloConEspacios = TituloHojaPrueba
```

Select Case TituloHojaPrueba

Case "FILTRABILIDAD"

TituloConEspacios = "RELACION DE FILTRABILIDAD"

Case "DEGRAMECANICA"

TituloConEspacios = "DEGRADACIÓN MECANICA"

Case "DEGRATERMICA"

TituloConEspacios = "DEGRADACIÓN TÉRMICA"

End Select

Sheets(Titulo2).Range("B2").Value = TituloConEspacios + " DE LAS SOLUCIONES
POLIMÉRICAS DEL CAMPO (" + UCase(TituloCampo) + ")"

Sheets(TituloCampo).Select

Set rangoTrabajo = Sheets(TituloCampo).Range("B9")

Set rangoTrabajo = rangoTrabajo.Resize(filas, 2)

'rangoTrabajo.Select

'Selection.Copy

Sheets(Titulo2).Select

Set rangoACopiar = Sheets(Titulo2).Range("b8:g16")

Set rangoDestino = rangoACopiar

rangoACopiar.Select

Selection.Copy

For i = 1 To filas

```
rangoDestino.Cells(3).Value = rangoTrabajo.Cells(2 * (i - 1) + 1).Value
```

```
rangoDestino.Cells(9).Value = rangoTrabajo.Cells(i * 2).Value
```

```
If (i < filas) Then
```

```
    Set rangoDestino = rangoDestino.Offset(0, 7)
```

```
    rangoDestino.Select
```

```
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteAll
```

```
End If
```

```
Next
```

```
Sheets(Titulo2).Range("XFD6").Value = filas
```

```
Application.Goto Reference:="R8C3"
```

```
End Sub
```

```
Function ColumnaLetra(i) As String
```

```
    Select Case i
```

```
        Case 1
```

```
            ColumnaLetra = "C"
```

```
        Case 2
```

```
            ColumnaLetra = "D"
```

```
        Case 3
```

```
            ColumnaLetra = "E"
```

```
        Case 4
```

ColumnaLetra = "F"

Case 5

ColumnaLetra = "G"

Case 6

ColumnaLetra = "H"

Case 7

ColumnaLetra = "I"

Case 8

ColumnaLetra = "J"

Case 9

ColumnaLetra = "K"

Case 10

ColumnaLetra = "L"

Case 11

ColumnaLetra = "M"

Case 12

ColumnaLetra = "N"

Case 13

ColumnaLetra = "O"

Case 14

ColumnaLetra = "P"

Case 15

ColumnaLetra = "Q"

Case 16

ColumnaLetra = "R"

Case 17

ColumnaLetra = "S"

Case 18

ColumnaLetra = "T"

Case 19

ColumnaLetra = "U"

Case 20

ColumnaLetra = "V"

Case 21

ColumnaLetra = "W"

Case 22

ColumnaLetra = "X"

Case 23

ColumnaLetra = "Y"

Case 24

ColumnaLetra = "Z"

Case 25

ColumnaLetra = "AA"

End Select

End Function

5.2.9 Codificación botón agregar concentración

```
Private Sub CommandButton3_Click()

    Dim rangoTrabajo As Range

    Dim columnas, filas As Integer

    Application.Goto Reference:="R12C2"

    columnas = Range("XFD6").Value

    filas = Range("XFD7").Value

    Set rangoTrabajo = Selection.Resize(1, columnas + 1)

    rangoTrabajo.Select

    Selection.Copy

    Set rangoTrabajo = Selection.Offset(filas, 0)

    rangoTrabajo.Select

    filas = filas + 1

    Range("XFD7").Value = filas

    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteFormats, Operation:=xlNone, _
        SkipBlanks:=False, Transpose:=False

    Range("D13").Select

    Application.CutCopyMode = False

End Sub
```

5.2.10 Codificación botón ver grafica comparativa

```
Private Sub CommandButton4_Click()
```

```
    FormGraficas1.Show
```

```
End Sub
```

6. Conclusiones

En base al análisis de resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados por el instituto colombiano del petróleo, se determina que el parámetro de mayor importancia en la selección del polímero es la composición del agua de preparación de la solución polimérica, ya que son las propiedades del agua de preparación las que interactúan en primera instancia con la solución polimérica y esta compatibilidad es vital para un recobro mejorado exitoso.

Para yacimientos que tengan alta temperatura se debe solicitar al proveedor polímeros que en su composición contengan monómeros resistentes a los iones divalentes y a la temperatura tales como acrilamido trebutil sulfonado de sodio (ATBS), micro bloques o que contengan adicionalmente un porcentaje de un hidrófobo en caso de que además de alta temperatura se enfrente a una viscosidad alta, ya que el porcentaje de hidrófobo hace que, aunque tenga un peso molecular menor desarrolle buenas viscosidades.

Los procesos para decidir qué polímeros aplicar a cierto campo de petróleo se benefician de la implantación de sistemas de información integrados, con capacidad de registrar y comparar el comportamiento de los polímeros en laboratorio, proporcionando a la industria agilizar los

procesos de selección, dando una idea de qué tipos de polímeros presentan una mayor eficiencia bajo propiedades específicas de un yacimiento determinado.

7. Recomendaciones

Se recomienda realizar este análisis y compilación de resultados para otros métodos de recobro químico que ha empleado Ecopetrol para incrementar el recobro en los campos colombianos o sobre los cuales ha realizado la evaluación de mercado pertinente, tales como inyección de surfactante o la mezcla álcali-surfactante-polímero.

Considerando que los parámetros propuestos para la selección de polímeros propuestos en este trabajo corresponden a los resultados obtenidos de algunos campos evaluados, se recomienda que a medida que se realicen más evaluaciones y se obtengan más datos se evalúe el efecto de otros parámetros en el rendimiento de las soluciones poliméricas, para brindar una selección más precisa.

Es recomendable implementar estos sistemas de información integrados mediante programación en otras tecnologías de recobro químico, con el fin de ampliar el campo de estudio y facilitar la determinación de que tecnología aplicar, observar y comparar que métodos de recobro mejorado se han aplicado, y cuales han funcionado mejor en campos espejo.

En este trabajo de investigación se encontró que en campos que tenían propiedades similares, no se hacían las pruebas de laboratorio en un mismo polímero seleccionado para ambos campos, es por esto que se hace necesario hacer el estudio de un mismo polímero para varios campos, y así poder observar la variación de la eficiencia de este y así poder evaluar tendencias de comportamiento de los polímeros.

Referencias Bibliográficas

- Abidin.A. (2012). Polymers for enhanced oil recovery technology. *Procedia chemistry*, 11-16.
- Alejandro, C. (2013). Análisis y simulación numérica del proceso de biodegradación por hidrólisis de biopolímeros en aplicaciones biomedicas . Universidad de sevilla, capítulo 3.
- Alvarado, V., & Manrique, E. (2010). Enhanced oil recovery: Field planning and development strategies. USA, Elsevier.
- Amaya, G., Jiménez, R., & Mantilla, J. (2015). Design and Implementation of the First Flooding Project in Colombia: Yarigui-Cantagallo Field. SPE 177245.
- Beltran, M. (2012). Tecnología de polimeros procesado y propiedades. Universidad de Alicante.
- Broseta, D. e. (1995). Polymer adsorption/retention in porous media: effects of core wettability and residual oil. SPE Advanced Technology Series, 103-112.
- Castro.R. (2016). Polymer flooding to improve volumetric sweep efficiency in waterflliding processes. *Journal of oil,gas and alternative energy sources*, 71-90.
- Chang, H. (1978,August 1). Polymer Flooding technology yesterday,today, and tomorrow. Society of petroleum Engineers, doi:10.2118/7043-PA.
- database, P. p. (2019, enero 20). Polymer Porpierties Database. Retrieved from <https://polymerdatabase.com/polymer%20chemistry/Hydrolysis.html>
- David, B., & Levitt, G. A. (2008). Selection and Screenin od Polymers for Enhanced-Oil Recovery. SPE.
- Ecopetrol. (2016). Evaluación experimental de polimeros para recobromejorado. Piedecuesta: Ecopetrol S.A.

- Garcia, G. S., & Hinds, C. (2017). "Pilot Helth Check" metodologia para el mejoramiento de las condiciones en evaluación de ilotos de RECOBRO. ACIPET.
- González-Prolongo, M. (1997). Propiedades químicas y físicas de polímeros. E.T.S.I.A.Universidad politecnica de Madrid .
- Hartstein, A. (2006). Recovering 'Stranded Oil' Can Suntantially Add to U.S. Oil Supplies. Oficina de Energia Fósil del Departamento de Energía de EUA.
- Jiménez, R. (2010). Análisis comparativo de procesos de inyección de polímeros ejecutados en colombia. ACIPET, 1,2.
- Luo, P. e. (2001). Evaluation of a hydrophobycally associative polymer in Daqing ASP flooding. P.G.O.D.D. 20(6), 1-4.
- Manrique.E, e. (2010). EOR: current status and opportunities. SPE international.
- Mier, J. L. (1997). Sintesis de polimeros. Pesos moleculares. conformación y configuración. Dpto . de construcción Naváis. E.PS.Ferro, universidad de Coruña.
- Pancharoen, M. T. (2010). Inaccessible pore volume of associative polymer floods. SPE.
- Pastor, J. M., & Jawhari, T. (2003). Caracterización De Materiales Polímeros Mediante la Utilización de la Microespectroscopia Vibracional. Revista iberoamericana de polimeros.
- Schlumberger. (2019, 06 15). Oilfield Glossary. Retrieved from https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/a/acrylate_polymer.aspx
- Sheng, J. J. (2011). Modern Chemical Enhanced Oil Recovery. Kidlington.Elsevier.
- SNF. (2016). Geologia del petroleo sistemas petroliferos EOR. SNF.
- Sorbie.K. (1991). polymer-improved oil recovery. Heriot-Watt University.
- Stright, J. (2008). The Use of Polymers for Enhanced Oil Recovery: a Review. Petroleum Recovery Institute.

Taber, J. J. (1997). EOR Screening criteria revisited-part : introduction to Screening criteria and enhanced recovery field projects. SPE.

Thomas, A., & N, G. (2013). Some key features to consider when stuying acrilamide-Based polymers for chemical enhanced oil recovery. Oil and Gas Science and Technology.

Willhite, P. (2003). Enhanced oil Recovery. Spe Textbook series.