

EVALUACIÓN DEL USO DE LA BIOMASA DE ALGAS SECA COMO
MATERIAL PUENTEANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA
DISMINUIR EL DAÑO A LA FORMACIÓN PRODUCTORA.

KARIN YUNARIS RUIZ NÚÑEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2012

EVALUACIÓN DEL USO DE LA BIOMASA DE ALGAS SECA COMO
MATERIAL PUENTEANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA
DISMINUIR EL DAÑO A LA FORMACIÓN PRODUCTORA.

KARIN YUNARIS RUIZ NÚÑEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA DE PETROLEOS

Ingeniero de Petróleos. JAIME ALBERTO LOZA CASTILLO
DIRECTOR ICP

Ingeniero de Petróleos. CESAR AUGUSTO PINEDA GOMEZ
DIRECTOR UIS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA
2012

DEDICATORIA

A mí DIOS PADRE, quien me dio la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza, a ser perseverante en mi propósito y depositar en mi corazón amor e inteligencia para terminar este proyecto.

A mi familia, mi Madre Ivonne Cecilia quien me apoyo y me guió en mis caminos de travesía con sus buenos consejos, a mis hermanos Maxwell y Melissa, a mi abuela Leonor y tías que se preocuparon por mis avances en ello.

A mis profesores.....a mi tutor: Jaime Alberto Loza Castillo por brindarme su amistad, respeto, e incondicional amistad, por enseñarme a crecer como profesional y como persona.

A mis Amigos que me acompañaron en los momentos que más necesité, los que también fueron mis amigos de estudio, los quiero mucho.

A los que nunca dudaron que lograría este triunfo, Gracias.

KARIN RUIZ NUÑEZ

AGRADECIMIENTOS

A Jaime Alberto Castillo por haber sido mi tutor, director, amigo y apoyo durante este proyecto, por haber sido mi maestro, por mostrarme y enseñarme la importancia en ser mejor cada día como profesional y enseñarme un poco más de la vida con sus historias y experiencia.

A Cesar Augusto Pineda, por su gran colaboración y dedicación con este trabajo, por sus valiosos consejos y correcciones que me hacen crecer como profesional.

A Jaime Rodriguez, Luz Karime Galvis mi grupo de trabajo del laboratorio de Top-ICP y todos los compañeros de la oficina, Diego Suarez, Edwin Rodríguez, Carlos Naranjo, Reynaldo Rodríguez y Germán Castillo, que me enseñaron y me aconsejaron con todas mis dudas y preguntas, me gustó mucho haber compartido con todos ustedes.

A Duban y William, por su compañía y amistad incondicional, amigos para toda la vida, los quiero un montonnnnnnn.

A María Camila (mi frijolito), Natalia (el arrocito), Jair (Kai), a Marce (el huevito), Maggie (la carnesita molida) jajaja. Les agradezco enormemente su compañía, aunque fue poco el tiempo que estuvimos juntos en la U pero solo eso bastó para que seamos buenos amigos toda la vida.

Muchos besos a todos...

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA

Introducción.....	16
Objetivos	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos	18
1. Marco Teórico.....	19
1.1 BIOMASA	19
1.2 DAÑOS A LA FORMACIÓN:.....	22
1.3 LOS MATERIALES DE PUENTE:.....	24
1.4 REOLOGÍA.....	29
1.4.1 Propiedades De Los Fluidos De Perforación	29
1.4.2 Modelos Reológicos	33
2. Diseño de la Investigación	39
2.1 Pruebas Reológicas	40
2.2 Pruebas Físicoquímicas	40
2.3 Daño a la Formación	41
3. PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
3.1 FORMULACIÓN DE FLUIDOS	43
3.1.1 Formulación 1	44
3.1.2 Formulación 2.....	44
3.1.3 Formulación 3.....	45
3.2 PRUEBAS REOLÓGICAS	45
3.2.1 Fluido de Perforación Sin aditivo	46
3.2.2 Formulación con adición de biomasa seca	48
3.3 PRUEBA DE CONTENIDO DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS.....	57
3.4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR DIFRACCIÓN LASER DE LA BIOMASA DE ALGAS	59
3.5 PRUEBAS FÍSICOQUÍMICAS	64
3.5.1 Prueba de Azul de Metileno	64
3.5.2 Reología alta presión alta temperatura	65
3.5.3 Evaluación del pH	71
3.5.4 Biodegradabilidad.....	73

3.5.5	Eco-Toxicidad.....	75
3.6	DAÑO A LA FORMACIÓN	77
3.6.1	Distribución De Tamaño De Garganta De Poros Y Presión Capilar Por Inyección De Mercurio 77	
3.6.2	Filtración estática (PPT) Para Castilla Norte-A Taponamiento por Partículas	83
3.6.3	Análisis SEM antes del daño a la formación.....	94
3.6.4	Evaluación De Daño Por Lodo.....	103
3.6.5	Análisis SEM después del daño a la formación.....	112
	CONCLUSIONES	127
	RECOMENDACIONES	128
	BIBLIOGRAFÍA	129

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Calderas de biomasa y calefacción ecológica.....	20
Figura 3. Tamaño de granulometría	25
Figura 4. Viscosímetro Fann 35	29
Figura 5. Equipo de Filtrado API	31
Figura 6. Clasificación de los fluidos según la relación $t=f(y)$	35
Figura 7. Reograma esfuerzo de corte Vs RPM.....	46
Figura 8. Geles Vs Tiempo Formulación 1,2,3.	47
Figura 9. Volumen de filtrado (ml) Vs Formulación.....	47
Figura 10. Lecturas de Vp y Yp Vs Formulaciones	48
Figura 11. Reograma: Esfuerzo de corte Vs RPM	49
Figura 12. Geles Vs Tiempo Formulación 1+ Biomasa	49
Figura 13. Lecturas de Vp y Yp Vs Formulaciones	50
Figura 14. Filtrado Formulación 1 + adición de Biomasa (lpb)	50
Figura 15. Reograma: Esfuerzo de corte Vs RPM	51
Figura 16. Geles Vs Tiempo Formulación 2 + Biomasa	52
Figura 17. Lecturas de Vp y Yp Vs Formulaciones	52
Figura 18. Filtrado formulación 2 + adición de Biomasa (lpb)	53
Figura 19. Reograma: Esfuerzo de corte Vs RPM	54
Figura 20. Geles Vs Tiempo Formulación 3+ Biomasa	54
Figura 21. Lecturas de Vp y Yp Vs Formulaciones	55
Figura 22. Filtrado formulación 3 + adición de Biomasa (lpb)	56
Figura 23. Biomasa utilizada para el análisis.....	57
Figura 24. Distribución fracción acumulada Tamaño de Partícula	62
Figura 25. Distribución fracción en peso Tamaño de Partícula	63
Figura 26. Esfuerzo de Corte vs RPM Lodo Formulación 1	66
Figura 27. Geles vs Tiempo Lodo Formulación 1 HTHP	67
Figura 28. Esfuerzo de Corte vs RPM Lodo Formulación 1 + 8lpb de Biomasa HTHP	68
Figura 29. Geles vs Tiempo Lodo Formulación 1 + 8lpb de Biomasa HTHP.....	68
Figura 30. Esfuerzo de Corte vs RPM Lodo Formulación 2 HTHP	69

Figura 31. Geles vs Tiempo Lodo Formulación 2 HTHP	70
Figura 32. Muestra de la Formulación 1+ 8 lb de Biomasa seca después de los 21 días de seguimiento de pH	72
Figura 33. Formulación 1 después de los 21 días de seguimiento de pH.....	72
Figura 34. Composición de la Biomasa seca de algas.....	73
Figura 35. Curva de Biodegradación Biomasa seca	74
Figura 36. Microorganismos utilizados	75
Figura 37. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7716.50'	80
Figura 38. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7737.50'.....	80
Figura 39. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7820.50'	81
Figura 40. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7830.50'.....	81
Figura 41. Unión de la distribución de Tamaño de Garganta de Poros	82
Figura 42. Volumen de filtrado en un Disco de 20 micrones al mercurio	84
Figura 43. Formulación 1 en Disco de 20 μm	85
Figura 44. Formulación 1+ 4 lb Biomasa en Disco 20 μm	85
Figura 46. Formulación 1+ 8 lb Biomasa en Disco de 20 μm	86
Figura 47. Volumen de filtrado en un Disco de 40 micrones al mercurio	87
Figura 48. Formulación 1 en Disco de 40 μm	88
Figura 49. Formulación 1 + 4 lb Biomasa en Disco de 40 μm	88
Figura 50. Formulación 1 + 6 lb Biomasa en Disco de 40 μm	89
Figura 51. Formulación 1 + 8 lb Biomasa en Disco de 40 μm	89
Figura 52. Volumen de filtrado en un disco de 55 micrones al mercurio.....	90
Figura 53. Formulación 1 en Disco de 55 μm	91
Figura 54. Formulación 1 + 4 lb Biomasa en Disco de 55 μm	91
Figura 56. Formulación 1 + 6 lb Biomasa en Disco de 55 μm	92
Figura 57. Volumen de filtrado de la formulación 2	93
Figura 58. Aspecto general Prof.: 7716.50'	96
Figura 59. Composición general Prof.: 7716.50'	97
Figura 60. Detalle de poro despejado y sobrecrecimiento de cuarzo Prof.: 7716.50'.....	97
Figura 61. Caolinita como relleno de poro Prof.: 7716.50'	97
Figura 62. Detalle y Composición de la caolinita Prof.: 7716.50'	98
Figura 63. Mineral tamaño arcilla entre granos (Flecha) Prof.: 7716.50'	98
Figura 64. Detalle y Composición del mineral tamaño arcilla Prof.: 7716.50'	99
Figura 65. Detalle y Composición del residuo de posible lodo Prof.: 7716.50'	99

Figura 66. Aspecto y Composición general Prof: 7737.50'	100
Figura 67. Detalle de poro despejado sobrecrecimiento de cuarzo Prof: 7737.50'	100
Figura 68. Mineral tamaño arcilla sobre y entre granos (Flecha) Prof: 7737.50'	101
Figura 69. Detalle de la arcilla y Composición de la arcilla Prof: 7737.50'	101
Figura 70. Mineral de fosforo y tierras raras y Composición Prof: 7737.50'	102
Figura 71. Caolinita a borde de grano con aspecto suelto (K) Sobrecrecimiento de cuarzo (SQz) Prof: 7737.50'	102
Figura 72. Comportamiento de la Permeabilidad Lodo Formulación 1 + 8 lpb de Biomasa en el plug castilla Norte-A Prof. 7716.50 ft.	106
Figura 73. Comportamiento del Filtrado Dinámico y Filtrado Estático – Lodo Formulación 1 + 8 lpb de Biomasa en el plug castilla Norte-A Prof. 7716.50 ft.	107
Figura 74. Comportamiento de la Permeabilidad Lodo Formulación 2 en el plug castilla Norte-A Prof. 7737.50 ft.	108
Figura 75. Comportamiento del Filtrado Dinámico y Filtrado Estático- Lodo Formulación 2 en el plug castilla Norte-A Prof. 7737.50 ft.	109
Figura 76. Comportamiento de la Permeabilidad Lodo Formulación 1 en el plug castilla Norte-A prof.: 7830.50 ft.	110
Figura 77. Comportamiento del Filtrado Dinámico y Filtrado Estático – Lodo Formulación 1 en el plug castilla Norte-A Prof.: 7737.50 ft.	111
Figura 78. Descripción del procedimiento SEM después del daño	113
Figura 79. Aspecto general de la Golden ChlorellaTMOmega Prof: 7716.50'	113
Figura 80. Espectro de la Golden ChlorellaTMOmega Prof: 7716.50'	114
Figura 81. Detalle de material que impregna la muestra Prof: 7716.50'	115
Figura 82. Composición de zonas oscuras de la muestra Prof: 7716.50'	115
Figura 83. Aspecto y Composición general Prof: 7716.50'	116
Figura 84. Caolinita en espacio poroso Prof: 7716.50'	116
Figura 85. Ampliación de la Figura 84 Prof: 7716.50'	117
Figura 86. Composición Caolinita Prof: 7716.50'	117
Figura 87. Material orgánico sobre y entre grano Prof: 7716.50'	118
Figura 88. Caolinita entre poro Prof: 7716.50'	118
Figura 89. Material orgánico entre granos Prof: 7716.50'	119
Figura 90. Caolinita entre poro Prof: 7716.50'	119
Figura 91. Aspecto general del grafito Prof: 7737.50'	120
Figura 92. Composición general del grafito Prof: 7737.50'	120

Figura 93. Aspecto y Composición general Prof: 7737.50'	121
Figura 94. Material relleno de poro Prof: 7737.50'	122
Figura 95. Composición de la Figura 94 Prof: 7737.50'	122
Figura 98. Material sobre grano Prof: 7737.50'	124
Figura 99. Detalle y Composición del material sobre grano	124
Figura 100. Aspecto general Prof: 7737.50'	125
Figura 101. Composición del material Figura 100 Prof: 7737.50'	125
Figura 102. Material a borde de grano Prof: 7737.50'	126
Figura 103. Composición del material Figura 102 Prof: 7737.50'	126

LISTA DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 2. Formulaciones 1, 2,3.	46
Tabla 3. Formulación 1 + Biomasa seca (lpb)	48
Tabla 4. Formulación 2 + Biomasa seca (lpb)	51
Tabla 5. Formulación 3 + Biomasa seca (lpb)	53
Tabla 6. Resultados Prueba de Contenido de Sólidos y Líquidos.	58
Tabla 7. Distribución Granulométrica Tamaño de Partícula	60
Tabla 8. Parámetros Estadísticos	62
Tabla 9. Resultados pruebas de azul de metileno Formulación 1 con y sin Biomasa	64
Tabla 10. Programación de Temperaturas y Presiones Prueba de Reología HTHP	65
Tabla 12. Reología HTHP Lodo Formulación 1 + 8lpb de Biomasa.....	67
Tabla 13. Reología HTHP Lodo Formulación 2.	69
Tabla 14. Lecturas del pH durante 21 días.....	71
Tabla 15. Clasificación de toxicidad de la Biomasa seca	76
Tabla 16. Clasificación de toxicidad de sustancias peligrosas	76
Tabla 17. Propiedades petrofísicas básicas de las muestras.....	78
Tabla 18. Resultados de las pruebas de presión capilar por inyección de mercurio	79
Tabla 19. Filtrado en un Disco de 20 micrones al mercurio	84
Figura 45. Formulación 1+ 6 lb Biomasa en Disco de 20 μm	86
Tabla 20. Filtrado en un Disco de 40 micrones al mercurio	87
Tabla 21. Filtrado en un disco de 55 micrones al mercurio	90
Figura 55. Formulación 1 + 6 lb Biomasa en Disco de 55 μm	92
Tabla 22. Filtrado de la Formulación 2 Base	93
Tabla 23. Formulaciones para la evaluación de daño a la formación	103
Tabla 24. Propiedades petrofísicas básicas de los plugs de Castilla Norte-A	104
Tabla 25. Permeabilidades al Aceite (mD) y % de Retorno de permeabilidad.....	105
Tabla 26. Evaluación de Daño por el Lodo.....	105

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL USO DE LA BIOMASA DE ALGAS SECA COMO MATERIAL PUENTEANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN PARA DISMINUIR EL DAÑO A LA FORMACIÓN PRODUCTORA.¹

AUTOR: KARIN YUNARIS RUIZ NÚÑEZ²

PALABRAS CLAVES: Análisis DRX, Análisis SEM, Porosidad, Permeabilidad, Daño a la formación, Tamaño de Garganta.

DESCRIPCION:

El desempeño de un lodo de perforación depende de los aditivos adicionados en su preparación. La adición de los aditivos al fluido de perforación se realiza con el fin de obtener un proceso de perforación con un lodo estable cubriendo las necesidades que requiera el yacimiento.

El estudio y recopilación que se realiza en este informe se hace con el fin de observar el comportamiento que tiene la Biomasa de algas al ser incluido al lodo de perforación como un aditivo que cumpla la función de puentear en la cara de la formación, de esta manera encontrar la viabilidad del uso en los fluidos de perforación.

La metodología que se realiza con la biomasa de algas se basa en la evaluación de su comportamiento por medio de diferentes técnicas de seguimiento realizadas en los laboratorios ICP-ECOPETROL, esta evaluación se inicia con una serie de pruebas reológicas que evalúa el comportamiento del fluido de perforación con la Biomasa, el contenido de sólidos y líquidos que muestra si la biomasa es un elemento que ayuda a aumentar las propiedades físicas del fluido realizando una comparación con un fluido base y uno alterado con biomasa, las pruebas fisicoquímicas que consisten en técnicas que miden la reacción de la biomasa en el fluido de perforación, como lo es la cantidad de arcilla reactiva (Prueba de azul de metileno (MBT)), la reología alta presión alta temperatura (HTHP), la biodegradabilidad y eco toxicidad del material en diferentes ambientes expuestos, la prueba de difracción de Rayos X que mide la cantidad en fracción en peso según el tamaño de partícula, la presión capilar inyección de mercurio y análisis SEM partícula observa un antes y después del daño a la formación que arroja resultados de invasión del fluido a la formación de interés.

¹Proyecto de grado

² Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Director ICP Ing. Jaime Alberto Loza Castillo

Director UIS Ing. Cesar Augusto Pineda

ABSTRACT

TITLE: DRY SEAWEED BIOMASS USE EVALUATION AS A BRIDGING MATERIAL IN DRILLING FLUIDS TO DECREASE DAMAGE IN THE NET PAY.¹

AUTHOR: KARIN YUNARIS RUIZ NÚÑEZ²

KEY WORDS: DRX Analysis, SEM Analysis, Porosity, Permeability, Skin, Throat size.

Performance in a drilling mud depends on the additives during its preparation. Additives in drilling fluids are added to assure an stable mud during the drilling process, having into account the necessities if the reservoir.

The main objective of study and compilation made in this report is to observe the behavior of Seaweed biomass when included in a drilling fluid as an additive that works as a bridge connecting the fluid with the wellbore, therefore determining the viability of the additive.

The methodology used in the evaluation with seaweed biomass is based in its behavior through different follow up techniques made in the ICP-ECOPETROL laboratories; this evaluation begins with a series of rheological tests that evaluate performance of the drilling fluid containing biomass. The content of solids and liquids is shown if the biomass enhances the physical properties of the fluid, this stage of the study is completed by comparing a base fluid and one altered with biomass. The physical and chemical tests are those that measure de reactions of biomass in the drilling fluid, such as: amount of reactive clay (Methilene Blue Test MBT), high pressure and high temperature rheology (HTHP), biodegradability and eco toxicity of the material in different exposed environments, the X-Ray diffraction test which measures the amount in weight fraction according the size of the particle. The capillary pressure, the injection of mercury and the SEM analysis show a comparative state of the formation damage, therefore giving results of fluid invasion through the net pay.

¹Graduate work

²Physicochemical School of Engineering School of Petroleum Engineering
Director ICP Eng. Jaime Alberto Loza Castillo
Director ICP Eng. Cesar Augusto Pineda

INTRODUCCIÓN

El objeto de la investigación es evaluar la Biomasa seca como material puenteante en los fluidos de perforación, para tal fin de debe encontrar la viabilidad del uso del material en formaciones con problemas de alta permeabilidad e invasión de sólidos o pérdidas del fluido de perforación a causa de las propiedades petrofísicas del yacimiento, útil para los procesos de perforación y control del daño en la zona de interés.

El estudio se realiza en el Instituto Colombiano del Petróleo que cuenta con una amplia litoteca donde se almacenan los corazones o plugs de los diferentes pozos de Ecopetrol, para el estudio se utilizan núcleos del pozo Castilla-Norte-A, esta selección se realizó teniendo en cuenta un estudio avanzado realizado por personal de ECOPETROL-ICP hallado en un informe técnico que tiene por título: “Factibilidad Técnica de la Perforación Bajo Balance para un campo en la Cuenca de los Llanos Orientales” realizado en el campo Castilla donde describen zonas de pérdida por las altas permeabilidades en la zona productora, de allí partimos para realizar nuestros estudios y evaluar la efectividad de la Biomasa seca como material puenteante.

En el capítulo 1, se presentan los tipos de Biomasa encontradas en el medio ambiente y se muestra el uso que se le quiere dar al material en el fluido de perforación como material de puenteo, teniendo en cuenta el estudio preliminar que se realiza en el capítulo 2 con un diseño de la investigación, presentando una

serie de pruebas mencionadas de forma general a continuación, como: reológicas, fisicoquímicas y el estudio de daño a la formación.

En el capítulo 3 se inicia con las pruebas reológicas de la formulación base sin la adición de la Biomasa seca de algas para observar el comportamiento natural del fluido de perforación, luego se evalúa el aditivo con diferentes dosificaciones en la base del fluido de perforación, de esta manera se observa el cambio en el comportamiento reológico del fluido y se realiza un análisis e interpretación de los resultados.

Finalmente se encuentran las conclusiones y recomendaciones a las que se llegan con el presente estudio, y se muestran las bibliografías consultadas para la elaboración de la investigación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Encontrar la posibilidad del uso de la Biomasa seca y analizar el comportamiento que obtenga la Biomasa como material puenteante en los fluidos de perforación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar la cantidad apropiada de la Biomasa seca como aditivo para el fluido de perforación y evaluar su comportamiento en zonas de alta permeabilidad.
- Evaluar la penetración de la biomasa de algas en los núcleos de castilla norte A.
- Evaluar los cambios de las propiedades reológicas del lodo al adicionar la biomasa seca al igual que las propiedades de filtración y taponamiento.
- Evaluar la eco-toxicidad y la biodegradabilidad de la Biomasa seca de algas para identificar si el material es de alto riesgo para el medio acuático.

1. MARCO TEÓRICO

En los trabajos de perforación en la industria del petróleo, el daño a la formación es muy común debido a las características del yacimiento, con las nuevas técnicas se busca controlar el daño para aumentar la producción de la zona de la zona y poder tener una mayor rentabilidad económica.

1.1 BIOMASA

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible a ser aprovechada energéticamente.

Con la búsqueda de nuevas fuentes de energías alternativas y renovables se mencionan los sistemas de generación de energía a partir de la biomasa es decir la materia orgánica originada de un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

La producción controlada de biomasa a partir de algas se realiza en diversos tipos de sistemas de cultivo que dependen principalmente de la cepa de algas y de las condiciones climáticas, en otras circunstancias se utilizan reactores tubulares instalados en invernaderos.

La biomasa de algas evaluada en esta investigación ha sido proveída por una compañía que la obtiene como desecho de la producción de biocombustibles, este material se puede obtener a diferentes tamaños de grano, la que se recibió en el ICP-Ecopetrol ha sido una biomasa que no tiene definido su tamaño por la compañía.

1.1.1 TIPOS DE BIOMASA

La más amplia definición de biomasa sería considerar como tal a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Clasificándolo de la siguiente forma:

1.1.1.1 BIOMASA NATURAL: es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Calderas de biomasa y calefacción ecológica

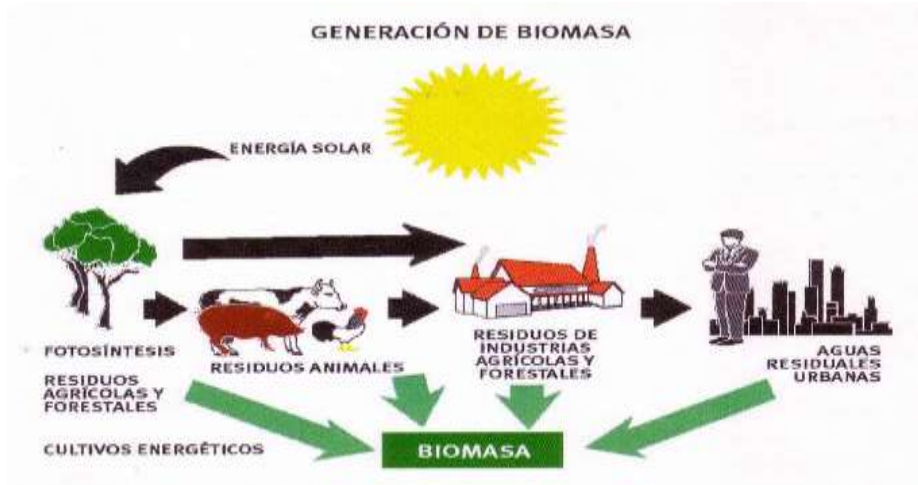


Fuente: extraído de <http://www.calordom.com>.

1.1.1.2 BIOMASA RESIDUAL: Es la que genera cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como, basuras y aguas residuales.

1.1.1.3 BIOMASA PRODUCIDA: Es la cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en vez de producir alimentos, como la caña de azúcar en Brasil, orientada a la producción de etanol para carburante. (Figura 2).

Figura 2. Plantas de Biomasa



Fuente: extraído de <http://www.opex-energy.com/biomasa>

La naturaleza de la biomasa es muy variada, ya que depende de la propia fuente, pudiendo ser animal o vegetal, pero generalmente se puede decir que se compone de hidratos de carbono, lípidos y proteínas. Siendo la biomasa vegetal la que se compone mayoritariamente de hidratos de carbono y la animal de lípidos y proteínas.

Según Iñaki Tejero uno de los responsables del proyecto de la universidad de Cantabria de la producción de biomasa a partir de algas dice que: “Hasta ahora la biomasa de algas se ha utilizado para objetivos muy concretos, como la depuración de aguas residuales y la producción de combustibles. Pero los usos pueden ser mucho más, además del energético. Alimentación animal, subproductos para la alimentación humana, extracción de esencias y fármacos”.¹

¹ “Desarrollo de producción de algas con aplicaciones energéticas”: <http://www.e-ficiencia.es/desarrollo-de-produccion-de-algas-con-aplicaciones-energeticas>

Este proyecto realiza una investigación para buscar la viabilidad del uso de la biomasa de algas como aditivo en fluidos de perforación realizando una serie de pruebas con el fin de evaluar el efecto del material en el yacimiento.

1.2 DAÑOS A LA FORMACIÓN:

Las partículas sólidas contenidas en los fluidos de perforación son potencialmente peligrosas desde el punto de vista del daño de formación. Arcillas, recortes (cutting), agentes densificantes y viscosificantes, agentes minimizadores de pérdidas de circulación, cuando estos son forzados hacia la formación productiva pueden agresivamente disminuir la porosidad y permeabilidad de la roca reservorio,

El daño a la formación puede darse a causa de diferentes procesos en el pozo:

- Durante la perforación y completamiento
- Durante la producción
- Durante la limpieza del pozo
- Durante el tratamiento ácido
- Daño por pozos inyectoros
- Emulsiones
- Cambios de mojabilidad
- Depósitos orgánicos
- Depósitos mixtos

El principal motivo de daño a la formación que se estudia en esta investigación, se hace a causa de la invasión de sólidos o la infiltración del lodo en la formación productora que se da en la perforación de pozos.

Al comienzo de una prueba de filtración existe una fuga de lodo (“spurt loss”) antes que se inicie la filtración propiamente dicha, esta filtración puede ser mayor cuando existen zonas altamente permeables y puede llegar a ser incontrolable a menos que el lodo de perforación contenga sólidos del tamaño requerido según el tamaño de garganta para llenar los poros de la roca y establecer una base sobre la cual se puede formar la torta de lodo en la cara de la formación.

Las partículas de cierto tamaño relativo al tamaño de los poros de la formación pueden efectuar este llenado, las partículas de gran tamaño no pueden entrar a los poros y son arrastradas por la corriente de lodo, y las partículas más pequeñas invaden la formación.

Para minimizar el daño a la formación se debe seleccionar el tamaño adecuado del material puenteante en el lodo de perforación con base en la determinación del tamaño promedio de la garganta de los poros.

El daño a la formación genera un bajo índice en la productividad, pero no es la única causa a la cual se le debe atribuir un bajo índice de la productividad. Se debe hacer un diagnóstico correcto para evaluar las causas que puede ser cualquiera de las siguientes:

- Baja permeabilidad natural
- Baja presión del yacimiento
- Área de drenaje reducida
- Ubicación del pozo en el área de drenaje
- Espesor pequeño de la arena
- Alta viscosidad del crudo

1.3 LOS MATERIALES DE PUENTE:

Son utilizados para sellar formaciones altamente permeables o fracturas expuestas de una roca que son perforadas con lodos base agua, aceite o sintéticos, creando una torta que disminuye la invasión de fluidos y de partículas hacia la formación.

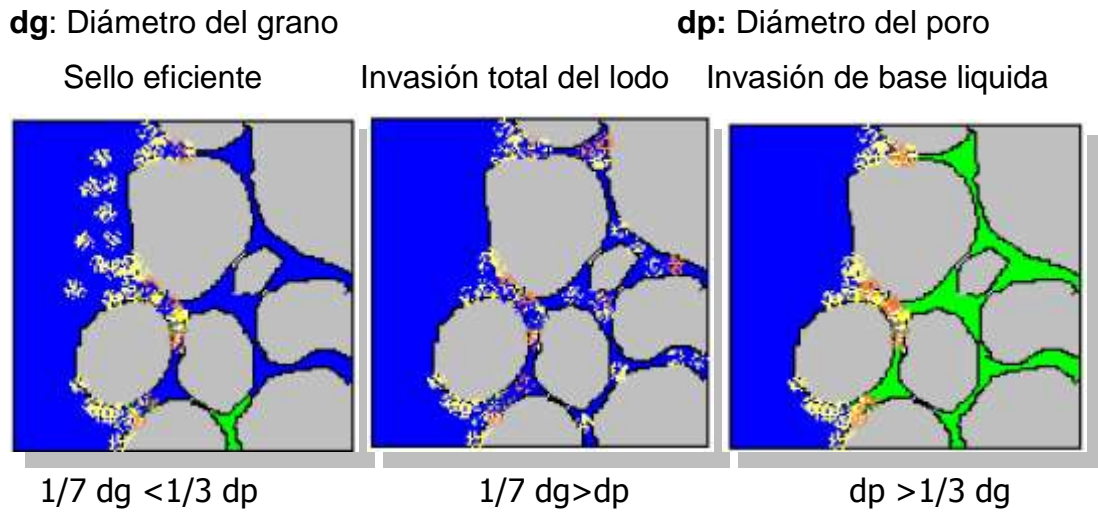
La selección de la granulometría del agente puenteante ha sido basado en diferentes criterios, como por ejemplo, Abraham propuso “el tamaño de partícula medio (D50) del material de puenteo debe ser igual o mayor que un tercio del tamaño mediano del poro de la roca para prevenir la obstrucción”², este criterio es utilizado en las pruebas realizadas en los laboratorios de daño a la formación de Ecopetrol- ICP aunque existen otros criterios propuestos por autores reconocidos, el criterio anteriormente mencionado se considera una regla general.

Como resultado de este proceso, se establecen tres zonas de partículas de lodo dentro de una formación permeable (Figura 3):

1. Una “torta” o revoque externo sobre las paredes de la formación.
2. Una “torta” o revoque interno que se extiende 2 diámetros de partículas de la formación dentro de las zonas perforadas.
3. Una zona invadida por las partículas finas durante la fuga de lodo, que normalmente se extiende alrededor de una pulgada dentro de la formación.

² Revista Tecnológica ESPOL, Optimización de un fluido “Drill-In” para perforar zonas hidrocarburíferas.

Figura 3. Tamaño de granulometría



Página Web: <http://www.seflucempo.com/common/docs/FORO%20VII%20SEFLU.pdf>

Los lodos con un bajo contenido de sólidos exhibirán altas fugas de lodo. Es conveniente entonces, mantener un bajo contenido de sólidos en el lodo desde el punto de vista de desempeño de la perforación, para evitar altas viscosidades del fluido, las filtraciones o daños a la formación hacia la zona de interés, por los contenidos de sólidos grandes o muy pequeños para el tamaño de garganta en la cara de la formación.

1.3.1 ADITIVOS COMO MATERIAL PUENTEANTE

En los últimos años la necesidad impetuosa de obtener grandes logros en el campo petrolero ha catalogado como innovadoras a las ciencias de Ingeniería de Producción y Fluidos de Perforación. Hoy día son enormes las inversiones que se hacen con el fin de facilitar la producción de petróleo y es por ello que las compañías de fluidos, están en la constante búsqueda de técnicas basadas en la formulación de fluidos para perforar zonas productoras que causen un mínimo daño a la formación, que sean compatibles con ella y que contengan un buen material puenteante.

A continuación se mencionan los productos más utilizados como materiales puenteantes en la industria³:

CARBONATO DE CALCIO: El carbonato de calcio como material puenteante ha sido utilizado desde hace muchos años para prevenir la disminución de la productividad de los pozos productores, atribuida a los sólidos suspendidos en los fluidos de perforación y la invasión de filtrado a las zonas productoras.

El carbonato de calcio es un agente puenteante y densificante soluble en ácido, para fluidos de perforación, perforación de yacimiento y reparación/terminación. El carbonato de calcio viene disponible en tres tamaños de molienda estándar, Fino (F), Mediano (M) y Grueso (C). Como agente puenteante y aditivo para el filtrado, las concentraciones normales oscilan entre 10 y 50 lb/bbl (de 29 a 143 kg/m³).

CELL-U-SEAL: es una fibra de celulosa, agente obturante superior y material de pérdida de circulación (LCM por sus siglas en inglés), diseñado para puentear y

sellar formaciones permeables en los sistemas de lodo base agua, base aceite y base sintético.

El tratamiento recomendado para perdidas medianas a graves del material Cell-U-Seal es de 25 a 40 lb/bbl (71.3 a 114 kg/m³) por la zona de perdida.

KWIK-PLUG Mediano y Grueso: son bentonitas de tamaño específico compuestas por arcilla natural utilizada para sellar y taponar pozos terrosos. El material KWIK-PLUG viaja a través del agua presente en el agujero y alcanza el fondo del pozo con una hidratación o hinchamiento mínimo. El espacio anular se puede llenar por completo y se puede minimizar el puenteo de las partículas situadas en la porción superior del agujero.

G-SEAL: El grafito G-SEAL es un agente de taponamiento de tamaño grueso que se utiliza para puenteo y sellar formaciones permeables en sistemas de lodo base agua, base aceite o base sintético. Al estar perforando zonas agotadas donde existen altas presiones diferenciales, las capacidades de puenteo y taponamiento del producto G-SEAL reducen las tendencias de pegaduras por presión diferencial. Puede utilizarse para controlar la infiltración en zonas con pérdidas de circulación parciales a severas. El agente de taponamiento G-SEAL es completamente inerte y no afecta las propiedades reológicas. El agente G-SEAL reduce el torque y arrastre aumentando la lubricidad. El producto G-SEAL reduce los valores de pérdida inicial instantánea y pérdida de filtrado total en Pruebas de Taponamiento de Permeabilidad (PPT) y estudio de laboratorio del estrato arenoso.

AGENTE OBTURANTE MIX-II: La fibrosa celulosa de MIX-II es un agente obturante superior, utilizado para puenteo y sellar formaciones permeables en los sistemas de lodo base agua, base aceite y base sintético. El puenteo y sellado de las formaciones permeables reduce las tendencias de pegadura por presión diferencial, lo que puede causar un alto torque y arrastre o la pega de la tubería. El

producto resulta particularmente útil para evitar la pega por presión diferencial al estar perforando zonas depletadas donde hay presencia de altas presiones diferenciales.

Tabla 1. Aditivos de material de puenteo

ADITIVOS	CONCENTRACIÓN
Carbonato de calcio	10-50 Lb/bbl
Cell-U-Seal	25-40 Lb/bbl
Kwik-Plug	20-40 Lb/ bbl
G-Seal	15-20 Lb/bbl
M-I.X-II	10-40 Lb/ bbl

Fuente: Autor

La biomasa de algas tiene alternativas para ser evaluado como material puenteante por su origen natural, disponibilidad comercial y por su aprovechamiento como desecho orgánico para crear soluciones como aditivo de perforación en la industria del petróleo.

Las ventajas posibles que se puedan encontrar en el material se pueden localizar en su origen como materia orgánica lo que puede llegar a ser biodegradable dentro de la formación sin generar daño a la zona de interés, buscando un tamaño de grano óptimo que tapone la cara de la formación sin que haya invasión de fluidos y de los sólidos.

³Productos de MI-SWACO, <http://esp.miswaco.com>

1.4 REOLOGÍA

En los lodos de perforación existen una serie de propiedades reológicas y parámetros que los definen y que deben controlarse durante la perforación, a continuación se mencionan dichas propiedades.

1.4.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

En los lodos de perforación existen una serie de propiedades reológicas y parámetros que los definen y que deben controlarse durante la perforación, en la reología se evalúan ciertos comportamientos mencionados a continuación:

1.4.1.1 VISCOSIDAD:

Resistencia del fluido a fluir, se determinan las lecturas del viscosímetro para calcular las propiedades del lodo de perforación a 120° F. Esta prueba se realiza bajo los parámetros recomendados en la Norma API 13 B-2.

Figura 4. Viscosímetro Fann 35



Fuente: Autor

1.4.1.2 VISCOSIDAD PLÁSTICA (VP):

Es la propiedad del lodo que describe la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica, es afectada por la concentración, tamaño y forma de los sólidos y la viscosidad de la fase líquida.

Un aumento en V_p significa un aumento en el contenido de sólidos y/o una reducción en el tamaño de estos.

1.4.1.3 PUNTO CEDENTE (Yp):

Es la parte de la resistencia al flujo debida al grado de dispersión o atracción entre las partículas de sólidos en el fluido en condiciones dinámicas. Es una función del tipo de sólidos y las cargas con ellos asociadas, concentración de estos sólidos y de la naturaleza iónica de las sales disueltas presentes en el fluido.

Es la propiedad que nos da la capacidad de transporte de los cortes de perforación.

$$Y_p = (\text{Lect } 300 - V_p) \text{ lb}/100 \text{ ft}^2$$

1.4.1.4 FUERZA DE GEL:

Es una medida de las propiedades tixotrópicas del lodo bajo condiciones estáticas.

Es la propiedad del lodo que describe la capacidad de suspensión de los sólidos del lodo y de perforación, cuando éste está estático.

El resultado del esfuerzo de gel es importante para conocer la magnitud de la suspensión de los recortes y del material densificante, este esfuerzo es medido con el viscosímetro a intervalos de 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos en unidades de $\text{lb}/100 \text{ ft}^2$ o Pa.

1.4.1.5 TEMPERATURA

La viscosidad de un líquido depende de la temperatura. A alta temperatura los líquidos son más fluidos mientras que a baja temperatura son más viscosos. Esto es debido a que la energía térmica hace más débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van der Waals.

1.4.1.6 FILTRACIÓN:

Es el volumen de la fase líquida del lodo que se halla para conocer la cantidad de lodo que se puede filtrar hacia las formaciones permeables al entrar en contacto durante la perforación.

Se realiza la prueba estándar API de filtración se realiza a temperatura ambiente y a 100 psi de presión o la prueba de filtración API de alta temperatura y alta presión (HTHP), se realiza a 500 psi de presión diferencial a través de la muestra de lodo (600 psi sobre el tope del fluido y 100 psi de contra presión mantenida dentro del recipiente). Esta prueba se realiza bajo los parámetros recomendados en la Norma API 13 B-2. (Figura 5.)

Figura 5. Equipo de Filtrado API



1.4.1.7 DENSIDAD:

Define la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes de la perforación, controlando de este modo las presiones litostática e hidrostática existentes en las formaciones perforadas.

Durante la perforación se pueden producir de forma natural variaciones en la densidad del lodo que deben controlarse y corregirse adecuadamente. Así, por ejemplo, un aporte de agua clara debido a la perforación de un nivel acuífero productivo, o simplemente a una infiltración puntual debida a precipitaciones intensas, puede diluir el lodo disminuyendo la densidad. Por otra parte, la densidad puede incrementarse por la incorporación de fracciones finas procedentes de la propia formación geológica que se estén perforando.

1.4.1.8 EL PH:

Las condiciones de equilibrio químico de un lodo marcan la estabilidad de sus características. Una variación sustancial del pH debida por ejemplo a la perforación de formaciones evaporíticas, salinas, calcáreas u horizontes acuíferos cargados de sales, puede provocar la floculación del lodo, produciéndose posteriormente la sedimentación de las partículas unidas.

El valor de pH se usa para describir la acidez y la basicidad de las soluciones, se define como logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno. Bajos valores de pH corresponden a una acidez creciente y altos valores de pH corresponden a una alta basicidad. En general los lodos de perforación deben ser alcalinos con pH que oscilen entre 8 y 13 para prevenir la corrosión en la tubería, preservar y activar los aditivos del lodo y mantener las propiedades reológicas.

1.4.2 MODELOS REOLÓGICOS

La comprensión de los problemas que se plantean en el estudio de las propiedades reológicas de los fluidos, se presenta a continuación una clasificación de los diversos comportamientos de los fluidos más habituales según su comportamiento reológico.

De modo general, la mayoría de los autores, coinciden al hacer una primera clasificación entre los fluidos newtonianos y no newtonianos, según su comportamiento reológico siga o no la ley de Newton de la viscosidad. Además, existen fluidos en los que su comportamiento depende del tiempo de actuación del esfuerzo realizado sobre ellos. Finalmente, existe otro grupo de fluidos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos elásticos a la vez, son los fluidos viscoelásticos.

Así, la clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma:

- Fluidos newtonianos.
- Fluidos no newtonianos.
- Fluidos viscoelásticos

1.4.2.1 FLUIDOS NEWTONIANOS:

Se ha definido un fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. En ausencia de éste, no existe deformación. Los fluidos se pueden clasificar en forma general, según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. Aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación se denominan fluidos newtonianos. La mayor parte de los

fluidos comunes como el agua, el aire, y la gasolina son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales. El término no newtoniano se utiliza para clasificar todos los fluidos donde el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de deformación.

1.4.2.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS:

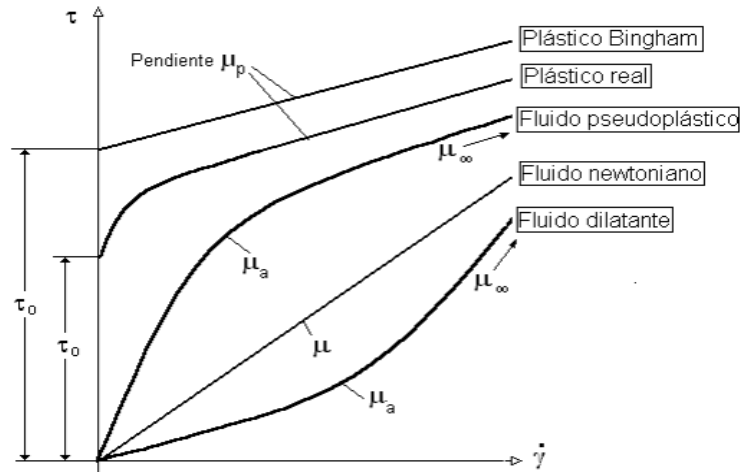
Son aquellos en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en *dependientes e independientes del tiempo*.

- **FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO:**

Los fluidos independientes del tiempo se han clasificado en tres categorías o grupos: plásticos, pseudoplásticos y dilatantes, y se caracterizan por que la viscosidad aparente sólo depende de la temperatura, de la composición del fluido y del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad aplicado, pero nunca del tiempo de aplicación de éste último.

Para visualizar y analizar los fluidos no-newtonianos resulta más cómodo representar el comportamiento de la función en un sistema de ejes coordenados cartesianos τ - $\dot{\gamma}$ según se indica en la Figura 6. Se pueden identificar 4 tipos de fluidos no-newtonianos independientes del tiempo.

Figura 6. Clasificación de los fluidos según la relación $\tau = f(\dot{\gamma})$



Página web: <http://es.scribd.com> Propiedades reológicas y pruebas de lodos de perforación

○ FLUIDOS PLÁSTICOS

Los fluidos plásticos son aquellos que no fluyen hasta que son sometidos a un esfuerzo cortante límite determinado, llamado esfuerzo de deformación plástica, umbral de fluencia o límite de fluencia, t_0 . En el caso de los fluidos plásticos de Bingham, una vez que se supera el valor del umbral de fluencia, la velocidad de deformación es proporcional al esfuerzo, como en el caso de los fluidos newtonianos (van Wazer et al., 1963). Estos fluidos exhiben propiedades de líquido a esfuerzos superiores al umbral de fluencia por lo tanto pueden ser clasificados tanto como líquidos como sólidos.

$$\tau = \tau_0 + (\partial u / \partial y)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$$

El modelo de plástico de Bingham es aplicable al comportamiento de muchos fluidos de la vida real como plásticos, emulsiones, pinturas, lodos de perforación y sólidos en suspensión en líquidos o agua.

○ **FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS**

Los fluidos pseudoplásticos se caracterizan porque su viscosidad aparente decrece cuando aumenta el gradiente de velocidad de deformación. Este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo, y es debido a la presencia de sustancias de alto peso molecular así como a la dispersión de sólidos en la fase sólida.

De los modelos utilizados para describir el comportamiento reológico de los fluidos pseudoplásticos, el más conocido y simple de aplicar es el de Ostwald-De Waale, también conocido como ley de la potencia (Sherman, 1970):

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \text{ siendo } n < 1$$

k y n son constantes para un fluido particular. La constante k es una medida de la consistencia del fluido y se denomina índice de consistencia, y el exponente n es indicativo de la desviación respecto al fluido con comportamiento newtoniano y se lo suele llamar índice de comportamiento.

○ **FLUIDOS DILATANTES**

La principal característica de este tipo de fluidos es que al aumentar la velocidad de deformación aumenta la viscosidad aparente.

La dilatancia puede explicarse entendiendo que cuando las velocidades de deformación son bajas las partículas sólidas de formas y tamaños variados, están ceñidas y estrechamente empaquetadas y la fracción líquida está llenando los huecos y lubricando el movimiento, por lo que la viscosidad aparente es baja. Con el aumento de la velocidad de deformación, las partículas largas y flexibles pueden estirarse rompiéndose el empaquetamiento de los sólidos y la fracción de huecos

entre las partículas aumenta, no habiendo suficiente líquido para lubricar el roce de unas partículas contra otras, aumentando por ello la viscosidad aparente.

- **FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO**

Son aquellos fluidos en los que la viscosidad aparente depende, además de la velocidad de deformación, del tiempo de actuación de dicha velocidad.

Los alimentos no newtonianos con propiedades dependientes del tiempo se subdividen en fluidos tixotrópicos y reopécticos. Para los primeros, a una velocidad de deformación fija, la viscosidad disminuye con el tiempo de cizallado; para los últimos, la viscosidad aumenta con el tiempo (Rao, 1977 b; Barbosa-Cánovas, et al., 1993).

- **FLUIDOS TIXOTRÓPICOS**

Se consideran fluidos tixotrópicos a todos aquellos que al aplicarles una velocidad de deformación constante, muestran una disminución del esfuerzo cortante y de la viscosidad aparente con el tiempo. Esto es debido al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible. La tixotropía indica una continua ruptura o reorganización de la estructura dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo (Rha, 1978).

- **FLUIDOS REOPÉCTICOS**

Los fluidos reopécticos tienen un comportamiento al flujo contrario a los tixotrópicos, es decir, la viscosidad aparente aumenta con el tiempo en que la muestra es sometida a un determinado gradiente de velocidad, lo que les confiere una cierta semejanza con los fluidos dilatantes en el sentido de que la única

diferencia es si el tiempo para la destrucción o formación de estructura es detectable o no.

El modelo reológico aplicable a estos fluidos es el de la ley de la potencia, siendo el valor del índice de comportamiento al flujo mayor que la unidad. Al igual que con los otros tipos de fluidos, para este tipo de alimentos se pueden aplicar otros modelos distintos con mayor o menor éxito.

1.4.2.3 FLUIDOS NO NEWTONIANOS VISCOELÁSTICOS

Las características de los productos viscoelásticos varían desde las de los líquidos viscosos con propiedades elásticas (modelo de Maxwell) a las de los sólidos con propiedades viscosas (modelo de Kelvin-Voigt). En condiciones normales, no es apreciable la elasticidad debida al estiramiento de los enlaces interatómicos y se puede afirmar que la elasticidad de los alimentos viscoelásticos es debida a la deformación elástica de las macromoléculas. En los alimentos viscoelásticos es frecuente que sólo se dé una recuperación parcial, porque la red tridimensional elástica se desintegra bajo el efecto de la tensión (Muller, 1973).

2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La Biomasa seca de Algas es un material que va a ser evaluado como material de puenteo en los fluidos de perforación a causa de altas permeabilidades en la cara de la formación, que se ven afectadas en el proceso de la perforación. Este proyecto ha sido planteado para evaluar un producto natural en los laboratorios de Ecopetrol-ICP.

Una de las características nombradas anteriormente son las altas permeabilidades en las zonas de interés, para el proyecto seleccionamos un pozo de un campo colombiano, perteneciente a la cuenca de los Llanos Orientales que es el pozo Castilla Norte A, que exhibe problemáticas que incurren en el daño a la formación y por consiguiente a la minimización de la producción.

Este campo ha sido estudiado detalladamente, teniendo en cuenta la severidad de los problemas operacionales, las propiedades físicas, petrofísicas y estabilidad de pozos para evaluar la factibilidad técnica de aplicar la Biomasa seca como material puenteante en fluidos de perforación en zonas estratégicas seleccionadas para la evaluación del aditivo.

Para evaluar la Biomasa seca de Algas se realizan procedimientos para su caracterización y comportamiento en los fluidos de perforación, estos análisis se realizan mediante una serie de pruebas reológicas, contenido de sólidos, pruebas fisicoquímicas, biodegradabilidad, daño a la formación, toxicidad, difracción de Rayos X, presión capilar inyección de mercurio y análisis SEM, todo esto para el conocimiento y la evaluación de un material como un nuevo aditivo en lodos de perforación.

2.1 PRUEBAS REOLÓGICAS

Los análisis de reologías evalúan el comportamiento de los aditivos en los fluidos de perforación a una condición de temperatura (120° F) y una presión atmosférica. Para el ingeniero de lodos, la reología es definir la viscosidad a diferentes velocidades de corte; utilizando un viscosímetro de velocidades múltiples.

Estas pruebas reológicas consisten en una serie de evaluaciones al fluido como: el uso del equipo FANN 35 A para la medición de esfuerzos, como la viscosidad plástica, Yield Point, fuerza de gel.

El uso del equipo de Filtración API, esta prueba provee una indicación de la invasión de filtrado del lodo hacia la formación. Se realiza una prueba API conducida a temperatura ambiente y 100 psi de diferencial en lodo base agua.

Esta prueba se realiza bajo los parámetros recomendados en la Norma API 13 B-2.

2.2 PRUEBAS FISICOQUÍMICAS

Estas pruebas consisten en técnicas que miden la reacción de la Biomasa seca de algas en el fluido de perforación, como lo es la cantidad de arcilla reactiva (Prueba de azul de metileno (MBT)), la reología alta presión alta temperatura (HTHP), la biodegradabilidad y eco toxicidad.

La Prueba de azul de metileno (MBT) o capacidad de intercambio catiónico se utiliza para determinar la cantidad de arcilla reactiva en el lodo a base de agua. Un tinte azul de metileno (un colorante catiónico) se utiliza para esta prueba, ya que magnetiza con fuerza los iones negativos en la arcilla. Típicamente, la prueba se expresan en términos de la concentración de arcilla reactivo en libras por barril,

para la operación de perforación buena, MBT se deben mantener a 15 lb / barril o menos.

En las pruebas de biodegradabilidad de una sustancia se realiza mediante una técnica respirométrica utilizando microorganismos aerobios en un medio acuoso utilizando un respirómetro automático a 20°C, la prueba está basada en la norma OCDE 301C (Ready Biodegradability: Modified MITI Test (I)). La prueba de biodegradabilidad rápida tiene una duración de 28 días. Puede detenerse antes de ese tiempo si la curva de biodegradación ha llegado a una meseta durante al menos tres determinaciones consecutivas. También pueden prolongarse por más tiempo cuando la curva indica que la biodegradación se ha iniciado, pero que la meseta no se ha alcanzado al día 28, pero en ese caso el producto químico evaluado no sería clasificado como rápidamente biodegradable.

La eco-toxicología estudia los efectos tóxicos causados por agentes contaminantes tanto naturales como sintéticos, a los componentes de los ecosistemas tratando de explicar sus causas y prever sus riesgos probables. Los agentes contaminantes son sustancias cuya ocurrencia en la naturaleza es al menos en parte el resultado de la actividad humana y que tienen un efecto deletéreo en los organismos vivos.

2.3 DAÑO A LA FORMACIÓN

Esta prueba comprende el estudio de la Biomasa seca como material de puenteo en la cara de la formación, para llevar a cabo esta serie de pruebas se realizan estudios que tienen en cuenta el tamaño de la partícula de la biomasa y el tamaño de la garganta de poro en la zona de interés. En esta prueba se evalúa el cambio

en la permeabilidad producido por la invasión de filtrado de lodo hacia la formación en el equipo de retorno de permeabilidad.

La investigación comienza con las pruebas reológicas, de filtrado API y de filtrado PPT bajo los parámetros recomendados en la Norma API 13 B-2 y se adjuntan los resultados de los análisis de las pruebas de DRX, SEM y las demás pruebas ya mencionadas elaboradas por el equipo de los laboratorios de Ecopetrol-ICP.

3. PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para establecer la aplicación de la Biomasa seca como material puenteante, se realizan pruebas reológicas a la base del fluido de perforación, de esta manera obtenemos las referencias del comportamiento reológico, filtrado API y filtrado PPT para observar el cambio que produce la adición de las dosificaciones de la biomasa seca de algas a la base del fluido.

La adición de la biomasa de algas se hace con ciertas dosificaciones de 2, 4 y 6 lpb al fluido de perforación base, a condiciones de alta temperatura y presión, condiciones similares a las del yacimiento se realizan diferentes pruebas reológicas.

A continuación se inicia con la evaluación de las formulaciones mencionadas y se muestran los resultados obtenidos de las pruebas reológicas y filtrado API.

3.1 FORMULACIÓN DE FLUIDOS

El análisis de la Biomasa de algas se realiza con tres formulaciones de fluidos de perforación que son:

3.1.1 FORMULACIÓN 1

FUNCION-FAMILIA QUIMICA	CANTIDAD
Viscosificante-Polisacárido	1.5 lpb
Reductor de filtrado-Almidón modificado	10.0 lpb
Reductor de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb
Controlador de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb
Estabilizador de esquistos- Poliamina etoxilada	4.0 lpb
Carbonato DF5	12.0 lpb
Carbonato DF25	8.0 lpb
Lubricante-Lípido	6.0 lpb
Biocida-Aldehído	0.5 lpb
Control de Ph-Hidróxido	pH 9.0

Fuente: Autor

3.1.2 FORMULACIÓN 2

FUNCION-FAMILIA QUIMICA	CANTIDAD
Viscosificante-Polisacárido	1.5 lpb
Reductor de filtrado-Almidón modificado	10.0 lpb
Reductor de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb
Controlador de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb
Estabilizador de esquistos- Poliamina etoxilada	4.0 lpb
Carbonato DF5	12.0 lpb
Carbonato DF25	8.0 lpb
Material de puenteo- Grafito	5.0 lpb
Lubricante-Lípido	6.0 lpb
Biocida-Aldehído	0.5 lpb
Control de Ph-Hidróxido	pH 9.0

Fuente: Autor

3.1.3 FORMULACIÓN 3

FUNCION-FAMILIA QUIMICA	CANTIDAD
Viscosificante-Polisacárido	1.5 lpb
Reductor de filtrado-Almidón modificado	10.0 lpb
Reductor de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb
Controlador de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb
Estabilizador de esquisto- Poliamina etoxilada	4.0 lpb
Carbonato DF5	12.0 lpb
Carbonato DF25	8.0 lpb
Material de puenteo- Grafito	5.0 lpb
Inhibidor de esquisto-Mezcla de asfaltos	6.0 lpb
Lubricante-Lípido	6.0 lpb
Biocida-Aldehído	0.5 lpb
Control de Ph-Hidróxido	pH 9.0

Fuente: Autor

3.2 PRUEBAS REOLÓGICAS

A continuación se muestran los resultados de las pruebas que se realizaron en el Viscosímetro Fann 35 a una temperatura de 120°F, se mide θ 600 rpm, θ 300 rpm, θ 200 rpm, θ 100 rpm, θ 6 rpm, θ 3 rpm, fuerza de gel de 10 seg, geles 10 min, viscosidad plastica, punto de cedencia (Yield Point) y los resultados de los volúmenes de filtrado en la filtro prensa API y PPT bajo las normas ya especificadas.

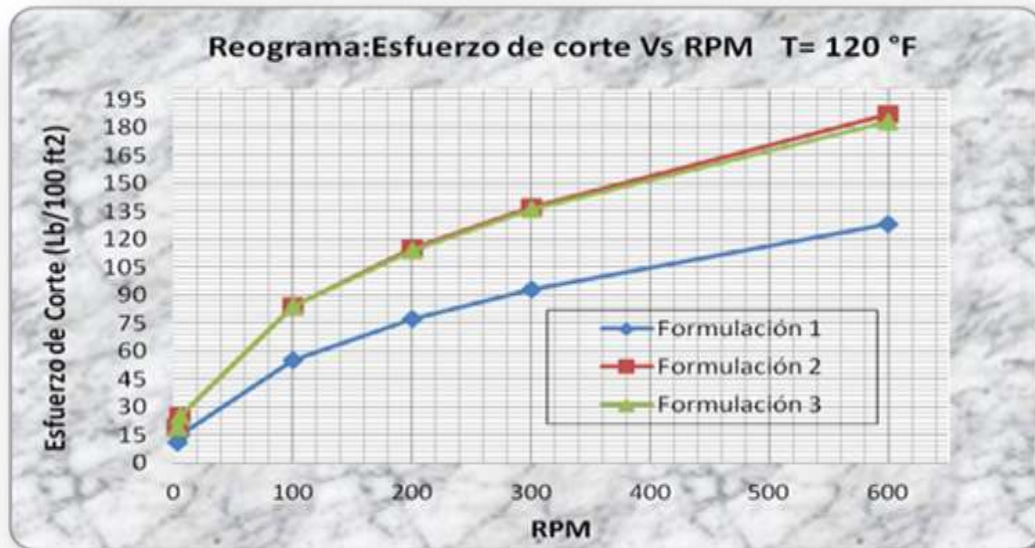
3.2.1 FLUIDO DE PERFORACIÓN SIN ADITIVO

Tabla 2. Formulaciones 1, 2,3.

Formulación (F)			
RPM	F. 1	F. 2	F. 3
Ø 600	128	187	183
Ø 300	93	137	136
Ø 200	77	115	114
Ø 100	55	84	84
Ø 6	15	25	25
Ø 3	11	19	19
Gel 10 seg	13	19	19
Gel 10 min	15	23	23
Gel 30 min	16	23	24
VP	35	50	47
YP	58	35	89
Filtrado en mililitros	4,8	5	4,4

Fuente: Autor

Figura 7. Reograma esfuerzo de corte Vs RPM



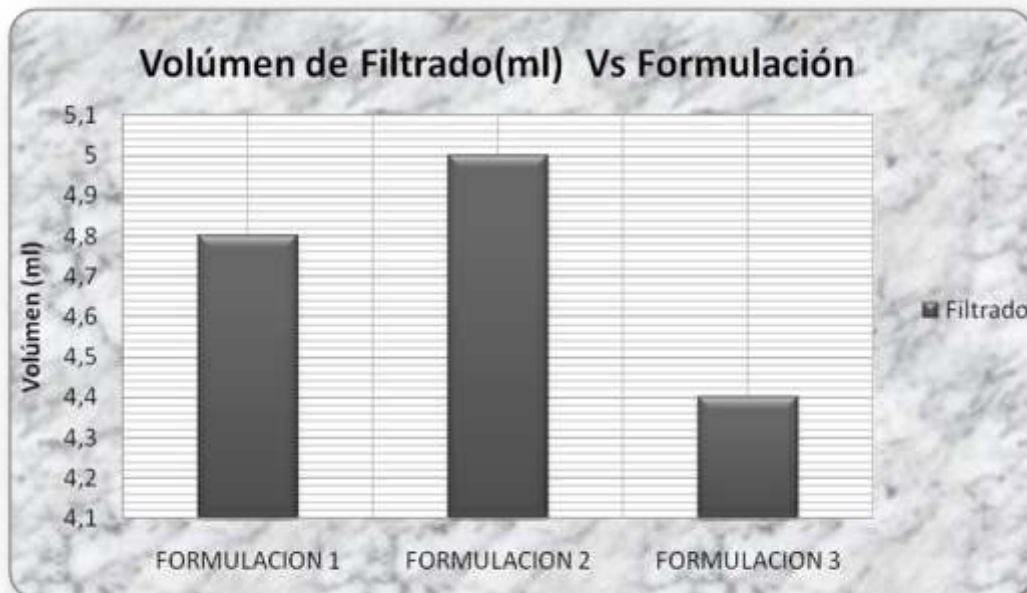
Fuente: Autor

Figura 8. Geles Vs Tiempo Formulación 1,2,3.



Fuente: Autor

Figura 9. Volumen de filtrado (ml) Vs Formulación



Fuente: Autor

Figura 10. Lecturas de Vp y Yp Vs Formulaciones



Fuente: Autor

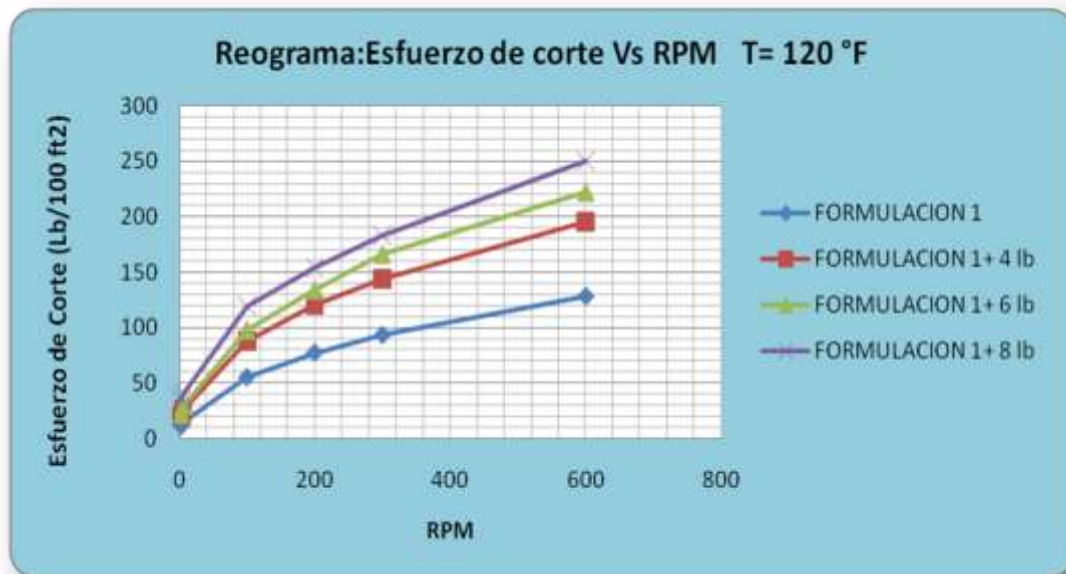
3.2.2 FORMULACIÓN CON ADICIÓN DE BIOMASA SECA

Tabla 3. Formulación 1 + Biomasa seca (lpb)

FORMULACIÓN 1 + BIOMASA SECA (LPB)				
RPM	F. 1	F. 1+ 4 lb	F. 1+ 6 lb	F. 1 + 8 lb
Ø 600	128	195	222	250
Ø 300	93	144	166	183
Ø 200	77	120	134	154
Ø 100	55	88	98	119
Ø 6	15	26	30	41
Ø 3	11	20	22	35
Gel 10 seg	13	20	22	34
Gel 10 min	15	24	25	35
Gel 30 min	16	24	28	35
VP	35	51	56	67
YP	58	93	110	116
Filtrado en mililitros	4,8	4,2	4,4	3,5

Fuente: Autor

Figura 11. Reograma: Esfuerzo de corte Vs RPM



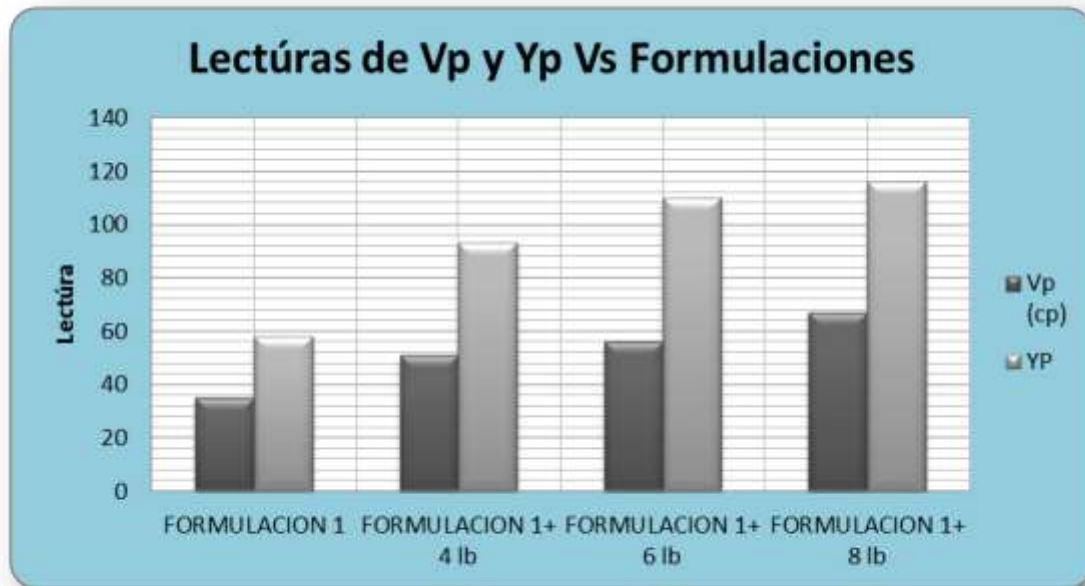
Fuente: Autor

Figura 12. Geles Vs Tiempo Formulación 1+ Biomasa



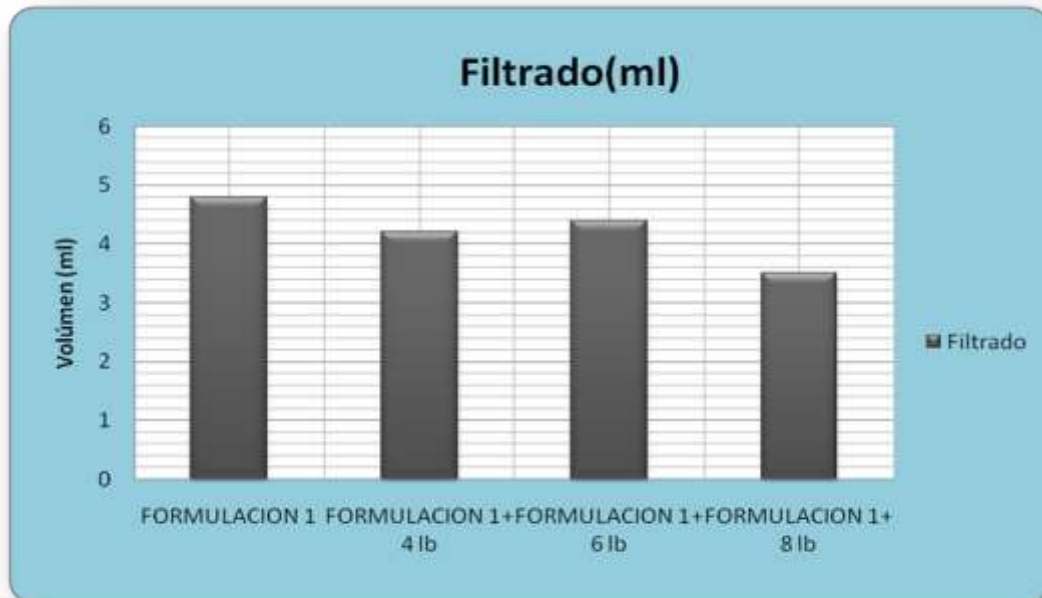
Fuente: Autor

Figura 13. Lecturas de Vp y Yp Vs Formulaciones



Fuente: Autor

Figura 14. Filtrado Formulación 1 + adición de Biomasa (lpb)



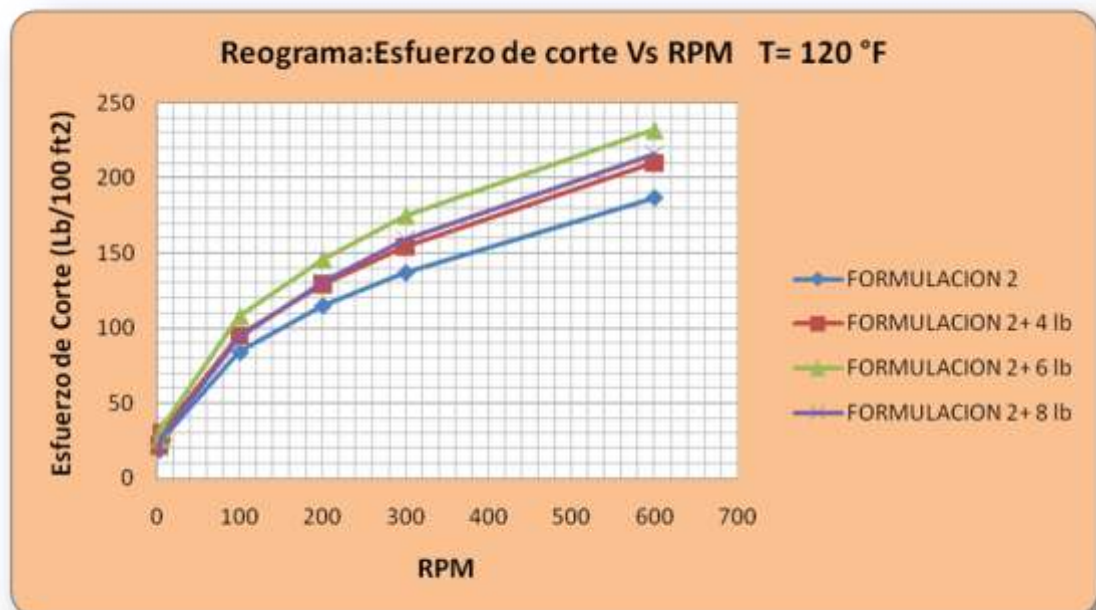
Fuente: Autor

Tabla 4. Formulación 2 + Biomasa seca (lpb)

FORMULACIÓN 2 + BIOMASA SECA (LPB)				
RPM	F. 2	F. 2+ 4 lb	F. 2+ 6 lb	F. 2 + 8 lb
Ø 600	187	210	232	216
Ø 300	137	154	175	159
Ø 200	115	129	146	131
Ø 100	84	95	108	94
Ø 6	25	30	33	27
Ø 3	19	22	26	20
Gel 10 seg	19	23	26	20
Gel 10 min	23	25	27	23
Gel 30 min	23	26	29	24
VP	50	56	57	57
YP	87	98	118	102
Filtrado en mililitros	5	2,6	4	3

Fuente: Autor

Figura 15. Reograma: Esfuerzo de corte Vs RPM



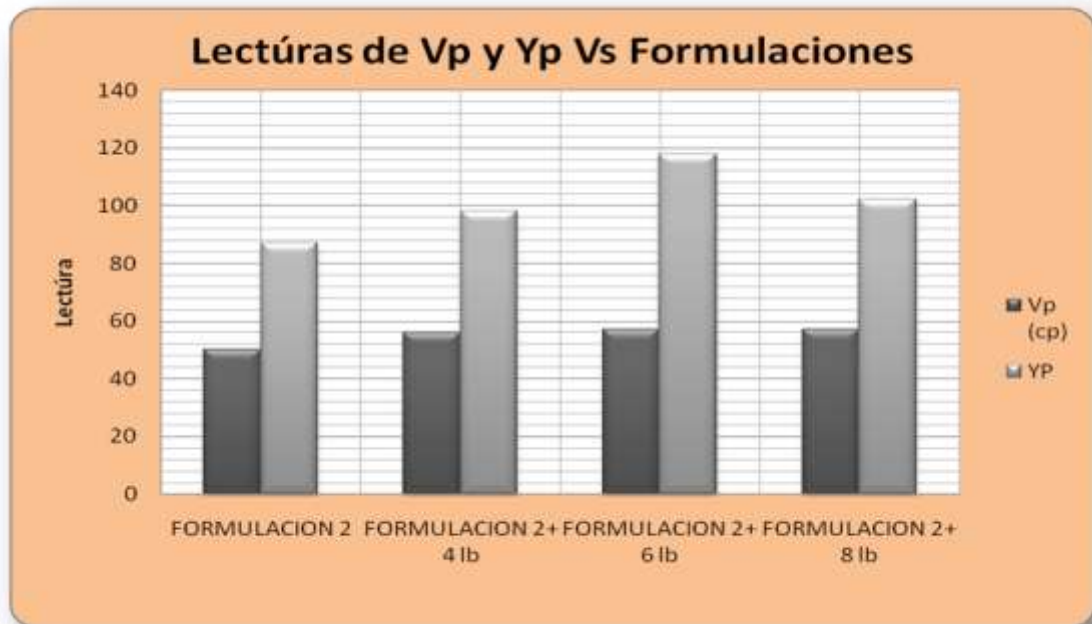
Fuente: Autor

Figura 16. Geles Vs Tiempo Formulación 2 + Biomasa



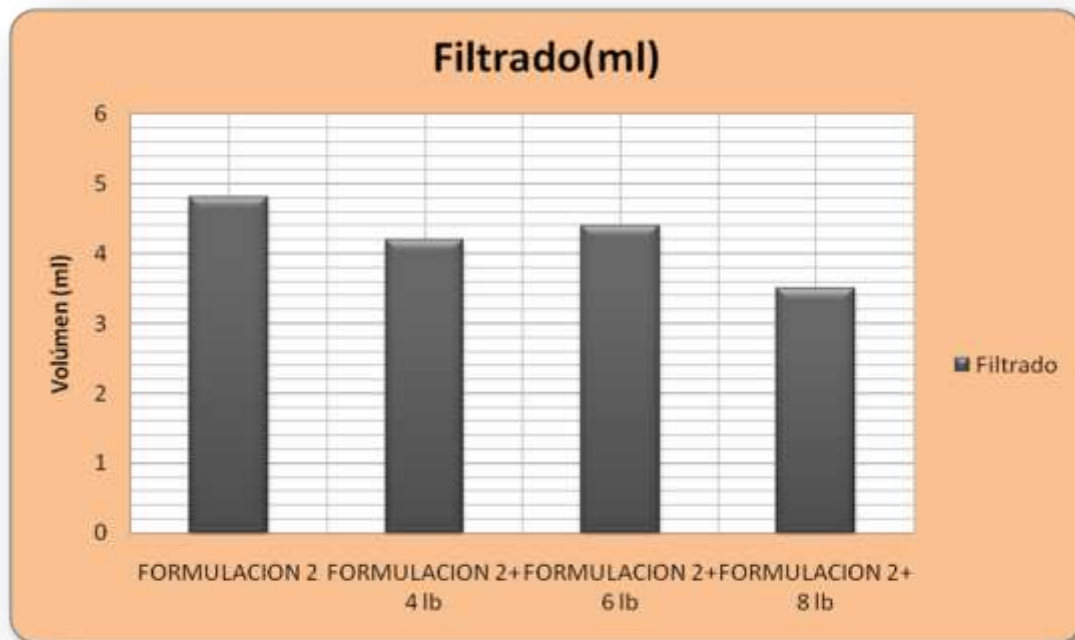
Fuente: Autor

Figura 17. Lecturas de V_p y Y_p Vs Formulaciones



Fuente: Autor

Figura 18. Filtrado formulación 2 + adición de Biomasa (lpb)



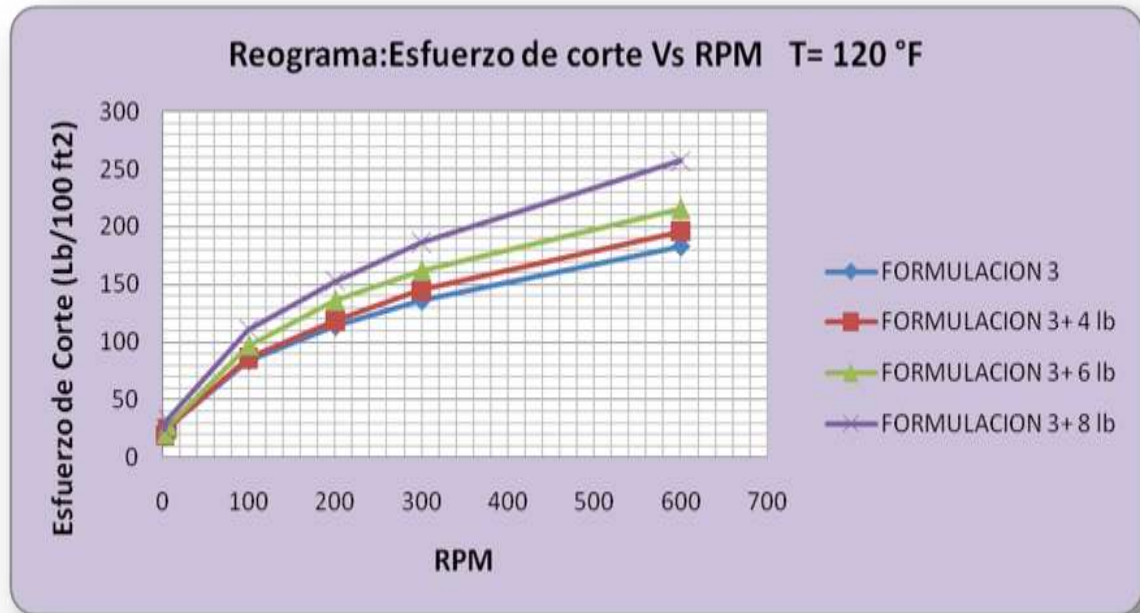
Fuente: Autor

Tabla 5. Formulación 3 + Biomasa seca (lpb)

FORMULACIÓN 3 + BIOMASA SECA (LPB)				
RPM	F. 3	F. 3+ 4 lb	F. 3+ 6 lb	F. 3 + 8 lb
ø 600	183	196	216	257
ø 300	136	145	162	186
ø 200	114	119	136	153
ø 100	84	86	97	111
ø 6	25	25	27	33
ø 3	19	19	20	24
Gel 10 seg	19	22	20	23
Gel 10 min	23	24	23	23
Gel 30 min	24	24	23	29
VP	47	51	54	71
YP	89	94	108	115
Filtrado en mililitros	4,4	4	3,5	3

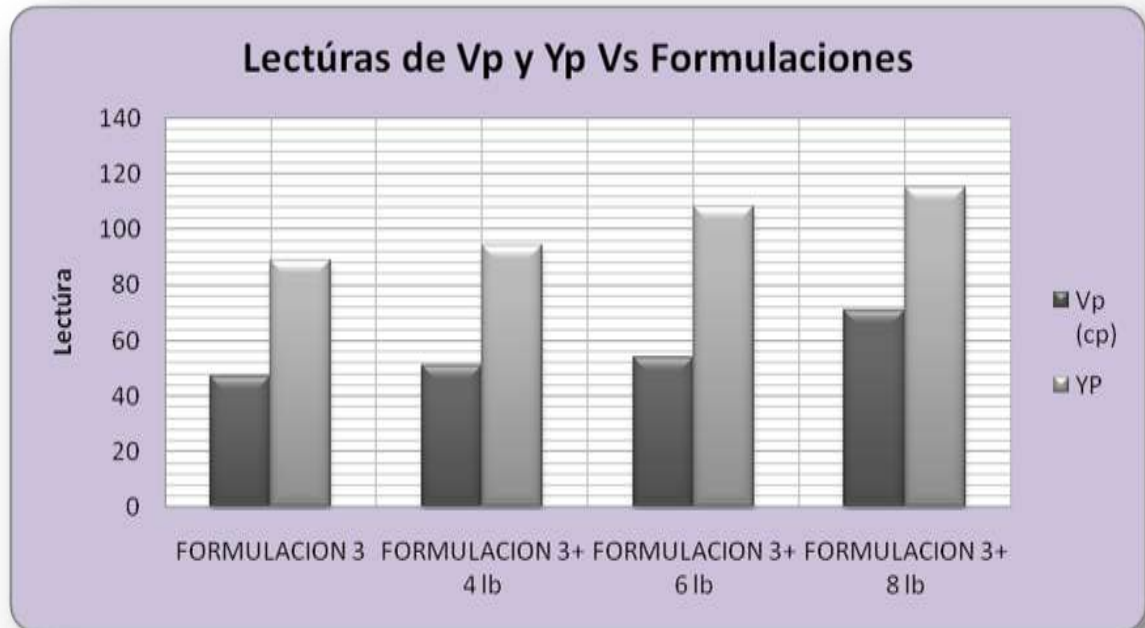
Fuente: Autor

Figura 19. Reograma: Esfuerzo de corte Vs RPM



Fuente: Autor

Figura 20. Geles Vs Tiempo Formulación 3+ Biomasa



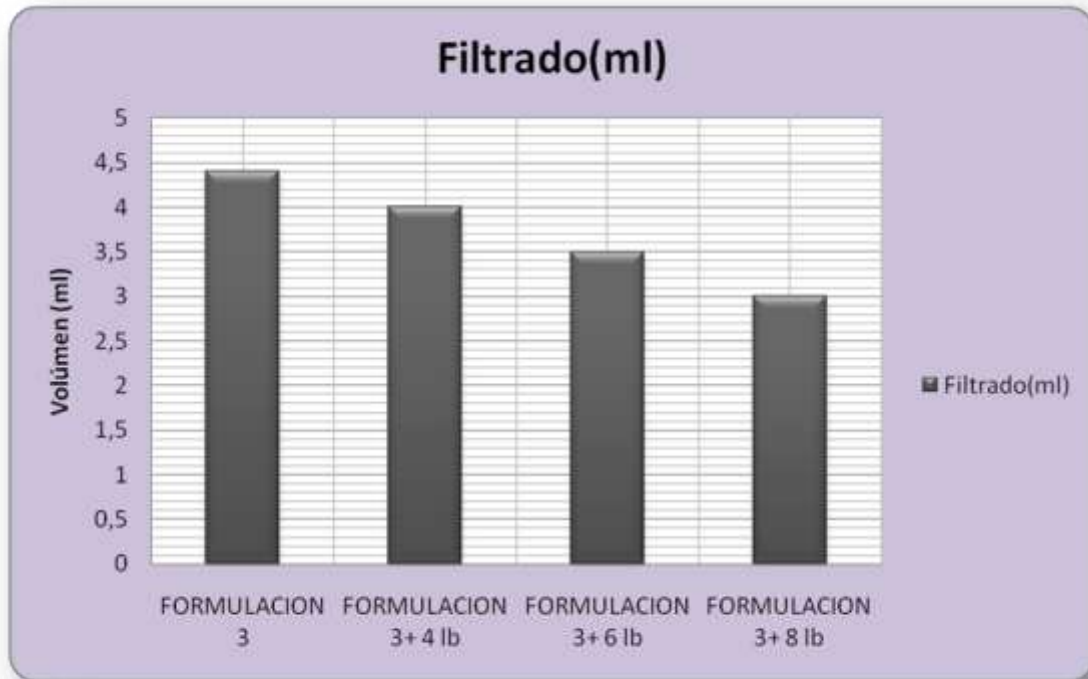
Fuente: Autor

Figura 21. Lecturas de V_p y Y_p Vs Formulaciones



Fuente: Autor

Figura 22. Filtrado formulación 3 + adición de Biomasa (lpb)



Fuente: Autor

3.2.3 OBSERVACIONES DEL COMPORTAMIENTO DE LAS FORMULACIONES:

- Las formulaciones más las adiciones de Biomasa (lpb) aumentan significativamente la viscosidad plástica (V_p) y el yield point (Y_p), lo que genera mayor viscosidad en el fluido de perforación y haría difícil su manejo en las instalaciones del taladro.
- La adición de Biomasa disminuye el filtrado lo que sería un factor positivo para el material evaluado en la formación.
- La adición de Biomasa aumenta significativamente los geles.
- La disminución de volumen de filtrado es observado en los comportamientos con la máxima cantidad de biomasa (8 lpb), por lo que en las siguientes pruebas se toma como base de análisis esta cantidad de aditivo.

3.3 PRUEBA DE CONTENIDO DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Esta prueba muestra el aumento de Contenido de Sólidos y Líquidos en el fluido de perforación, a continuación se muestra los resultados para las formulaciones 1, 2 y 3 sin Biomasa y con 8 lpb de Biomasa (tabla 6). La biomasa evaluada de muestra en la Figura 23.

Figura 23. Biomasa utilizada para el análisis



Se evaluaron las tres formulaciones con adición de 8 lpb de Biomasa con el fin de encontrar el aporte de la biomasa en el contenido de sólidos.

Equipo utilizado: Equipo de titulación.

Metodología utilizada: API RP 13B-1 2009 (Página 26).

La prueba de contenido de sólidos y líquidos se realiza con una solución de azul de metileno en incrementos de 0.5 ml con la bureta digital o micro pipeta. Después de cada adición, se agita el contenido del vaso por 30 segundos y, mientras los sólidos están suspendidos, remover una gota con la varilla de vidrio y colocarla en el papel filtro.

El punto final de la titulación se obtiene cuando aparece una aureola (anillo) de azul de metileno.

Una vez detectado el punto final de la titulación, agitar por dos minutos más y colocar otra gota en el papel filtro.

La Capacidad de Azul de Metileno del lodo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{CMBT} = (\text{ml de azul gastado}) / (\text{ml de muestra de lodo usada})$$

Tabla 6. Resultados Prueba de Contenido de Sólidos y Líquidos.

Lodo evaluado	% de Sólidos y Líquidos.	
	% Líquidos	% Sólidos
Lodo Formulación 1	94	6
Lodo Formulación 1 + 8 lpb de Biomasa	94	6
Lodo Formulación 2	94	6
Lodo Formulación 2 + 8 lpb de Biomasa	94	6
Lodo Formulación 3	94	6
Lodo Formulación 3 + 8 lpb de Biomasa	94	6

No se observan cambios en el contenido de sólidos y líquidos para las formulaciones con y sin Biomasa, significa que su gravedad específica es muy baja y adicionalmente se disuelve en el agua.

3.4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR DIFRACCIÓN LASER DE LA BIOMASA DE ALGAS

Para establecer la distribución de tamaño de partícula por Difracción Láser, se sigue el procedimiento UST-153-P-015, del manual de procedimientos del laboratorio de DRX.

La muestra se analizó con previa disgregación y el análisis granulométrico se realiza mediante la Técnica de Difracción láser. La difracción láser está basada en el fenómeno de dispersión de la luz causado por las partículas en todas direcciones, con un patrón que depende del tamaño de la partícula; las partículas difractan la luz en ángulos inversamente proporcionales a su tamaño. Por tanto, este patrón tiene información de la distribución de tamaños en la muestra, que se calcula a partir del patrón aplicando la teoría Mie para dispersión láser y el algoritmo de corrección para dispersión múltiple. Esta Teoría aplica principios de interacción electromagnética con la materia y predice los máximos y mínimos de intensidad producidos por las partículas cuando éstas son bombardeadas por una radiación Láser.

La distribución granulométrica obtenida corresponde al conteo realizado al volumen de partículas en las diferentes clases de tamaños representada en una distribución por área. Para cada una de las distribuciones se calcularon los siguientes parámetros:

- Tamaño de partícula promedio MV, el cual representa el tamaño que posee la mayor concentración de la distribución de densidad.
- Desviación estándar SD, el cual representa el ancho de la distribución.
- Percentiles X10, X40, X50, X60 y X90, representan el tamaño máximo al cual se encuentran el 10%, 40%, 50%, 60% y 90% de las partículas respectivamente.

Para el análisis granulométrico, el equipo utilizado corresponde a un Analizador de partícula Marca Microtrac modelo S3500 con tecnología de Difracción Tri-Láser en vía húmeda que permite el análisis de partículas tanto esféricas como de formas irregulares.

Los resultados mostrados en la Tabla 7, se reportan las distribuciones granulométricas obtenidas de acuerdo a la fracción en peso y al porcentaje acumulado pasante de estas fracciones para la muestra de Biomasa de Algas respectivamente.

Tabla 7. Distribución Granulométrica Tamaño de Partícula

Descripción Tamaño de Partícula (μm)	BIOMASA DE ALGAS – SZ 001	
	Fracción en peso (%)	Acumulado (%)
0.2	0.00	0.00
0.5	0.10	0.10
1	9.30	9.40
1.5	6.84	16.24
2	6.07	22.31
5	25.92	48.23
10	14.28	62.52
20	7.94	70.45
30	3.02	73.47
40	1.85	75.32
50	1.35	76.68
60	1.03	77.71
80	1.41	79.11
90	0.49	79.60
100	0.39	79.99
120	0.59	80.58
140	0.42	81.00

Descripción Tamaño de Partícula (μm)	BIOMASA DE ALGAS –SZ 001	
	Fración en peso (%)	Acumulado (%)
160	0.33	81.33
180	0.21	81.55
200	0.08	81.63
220	0.01	81.64
240	0.00	81.64
260	0.00	81.64
280	0.00	81.64
300	0.00	81.64
320	0.00	81.64
340	0.00	81.64
360	0.00	81.64
380	0.00	81.64
400	0.00	81.64
420	0.00	81.64
440	0.00	81.64
460	0.00	81.64
480	0.00	81.64
500	0.00	81.64
550	0.15	81.79
600	0.23	82.02
650	0.29	82.32
700	0.39	82.71
750	0.51	83.21
800	0.60	83.81
850	0.70	84.52
900	0.79	85.30
950	0.82	86.12
1000	0.80	86.92
1100	1.47	88.39
1200	1.60	89.99
1300	1.82	91.81
1400	1.81	93.62
1500	6.38	100.00

Tabla 8. Parámetros Estadísticos

Variable	Identificación	BIOMASA DE ALGAS –SZ 001
Promedio	MV(μm):	144.80
Desviación estándar	SD	36.28
Percentil 10	X10 [μm]	1.00
Percentil 40	X40 [μm]	3.45
Percentil 50	X50 [μm]	4.76
Percentil 60	X60 [μm]	6.98
Percentil 90	X90 [μm]	1200.55

Figura 24. Distribución fracción acumulada Tamaño de Partícula

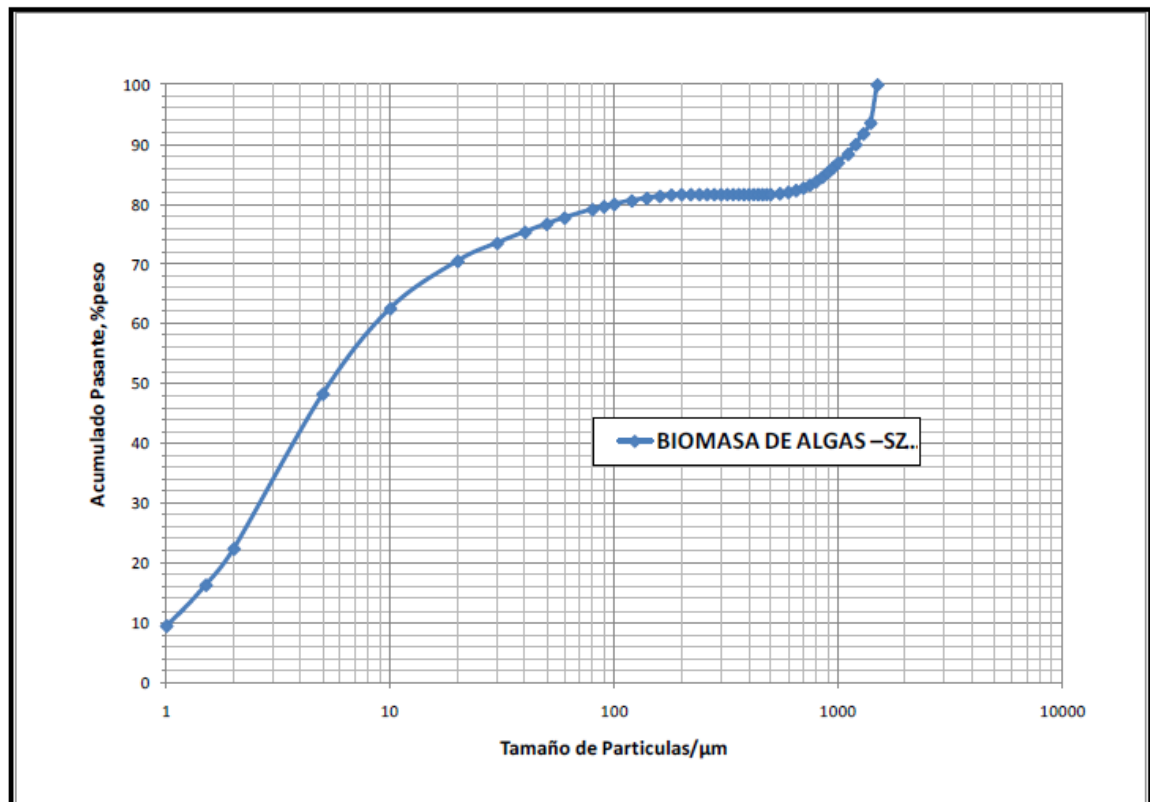
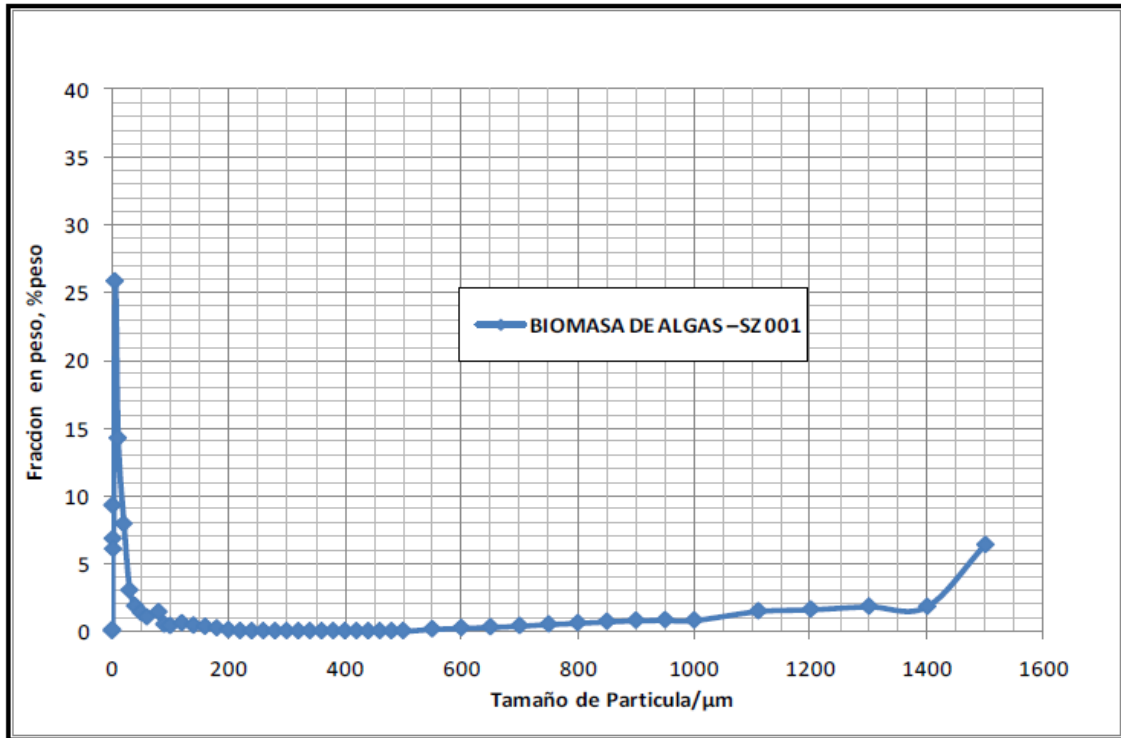


Figura 25. Distribución fracción en peso Tamaño de Partícula



En la Tabla 8 se reportan los parámetros estadísticos como son tamaño promedio y percentiles. Adicionalmente en las Figuras 24 y 25 se presentan en forma esquemática como es el comportamiento de las distribuciones de acuerdo a los porcentajes acumulado pasante y fracción en peso de las muestras analizadas respectivamente.

De acuerdo con la distribución granulométrica obtenida para esta muestra se concentra en tamaños de partículas entre 1 μm a 30 μm que corresponde al 73% en peso aproximadamente. Los tamaños superiores a 30 μm representan el 27% en peso. Adicionalmente esta muestra presenta una tendencia unimodal debido a su estrecho rango de distribución.

3.5 PRUEBAS FISICOQUÍMICAS

3.5.1 PRUEBA DE AZUL DE METILENO

Los resultados de la prueba de azul de metileno para las muestras de lodo Formulación 1 sin Biomasa y con 4, 6 y 8 lpb de Biomasa se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados pruebas de azul de metileno Formulación 1 con y sin Biomasa

Lodos evaluados	Prueba de azul de metileno
	C_{MBT} Bentonita equivalente (lbs/bbl)
Formulación 1	1.25
Formulación 1 + 4 lpb de Biomasa	1.25
Formulación 1 + 6 lpb de Biomasa	1.25
Formulación 1 + 8 lpb de Biomasa	1.25

Se observa que la actividad no cambia al agregar biomasa a la formulación 1 del lodo.

3.5.2 REOLOGÍA ALTA PRESIÓN ALTA TEMPERATURA

La Reología de los lodos evaluados se realizó a las siguientes condiciones de Presión y temperatura, determinando la viscosidad plástica, el punto de cedencia y evaluación de geles a 10 seg, 10 min y 30 min en cada una de las condiciones planteadas.

Esta prueba se realizó en el Viscosímetro OFITE - MODEL 77 HPHT VISCOMETER, se utilizó el procedimiento técnico de ensayo UST-LDF-I-041 Este procedimiento se basa en la Norma API RP 13D 2006 (Fifth Edition, June 2006).

Tabla 10. Programación de Temperaturas y Presiones Prueba de Reología HTHP

Temperatura	Presiones a Evaluar (psi)	
170 °F	1000	2000
220 °F	1000	2000

El comportamiento de las dosificaciones en la formulación 2 y 3 son muy similares, por lo que en las siguientes pruebas se analizan los comportamientos de la formulación 1 y la formulación 2.

A continuación se presentan los valores hallados de la viscosidad plástica (VP), el punto de cedencia (YP) y la fuerza gel.

Tabla 11. Resultados Reología HTHP Lodo Formulación 1

LODO FORMULACIÓN 1												
T (°F)	P (psi)	RPM						Geles			VP (cp)	YP (lb/100 ft ²)
		600	300	200	100	6	3	10 seg	10 min	30 min		
170	1000	132	94.2	77.2	55.6	16	12	11	13	13	38.1	56.1
170	2000	135	95.6	78.3	56.3	16	11	11	13	14	39.2	56.4
220	1000	89.1	62.4	50.3	34.7	6.7	4.1	4	4	4	26.7	35.7
220	2000	90.3	63.2	51	35.2	6.8	4.2	4	4	4	27.1	36.1

Figura 26. Esfuerzo de Corte vs RPM Lodo Formulación 1

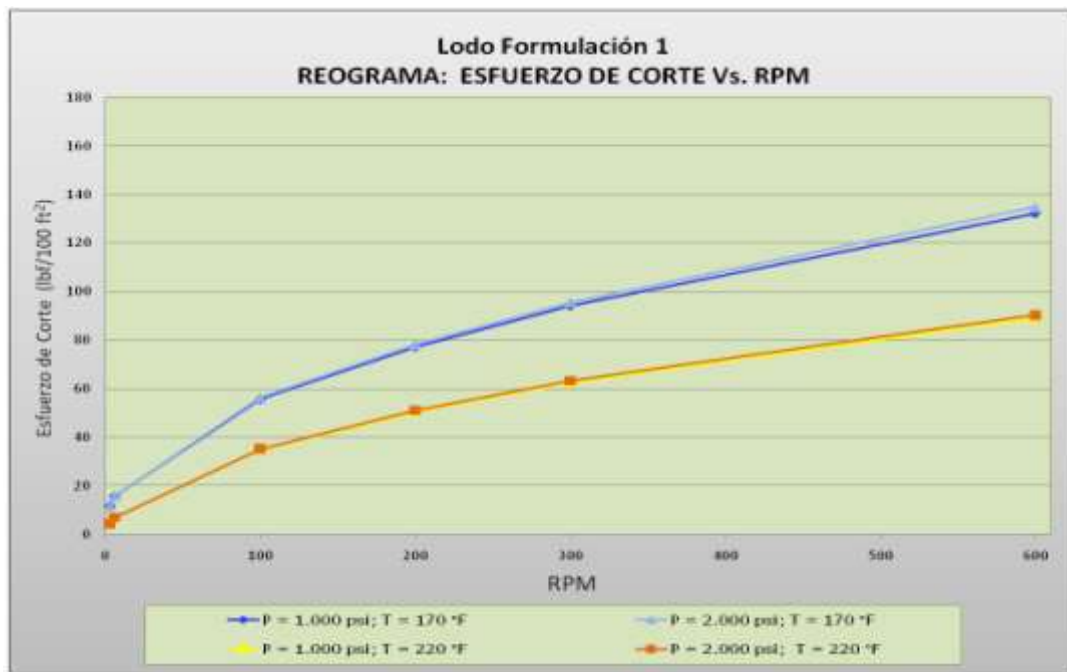


Figura 27. Geles vs Tiempo Lodo Formulación 1 HTHP

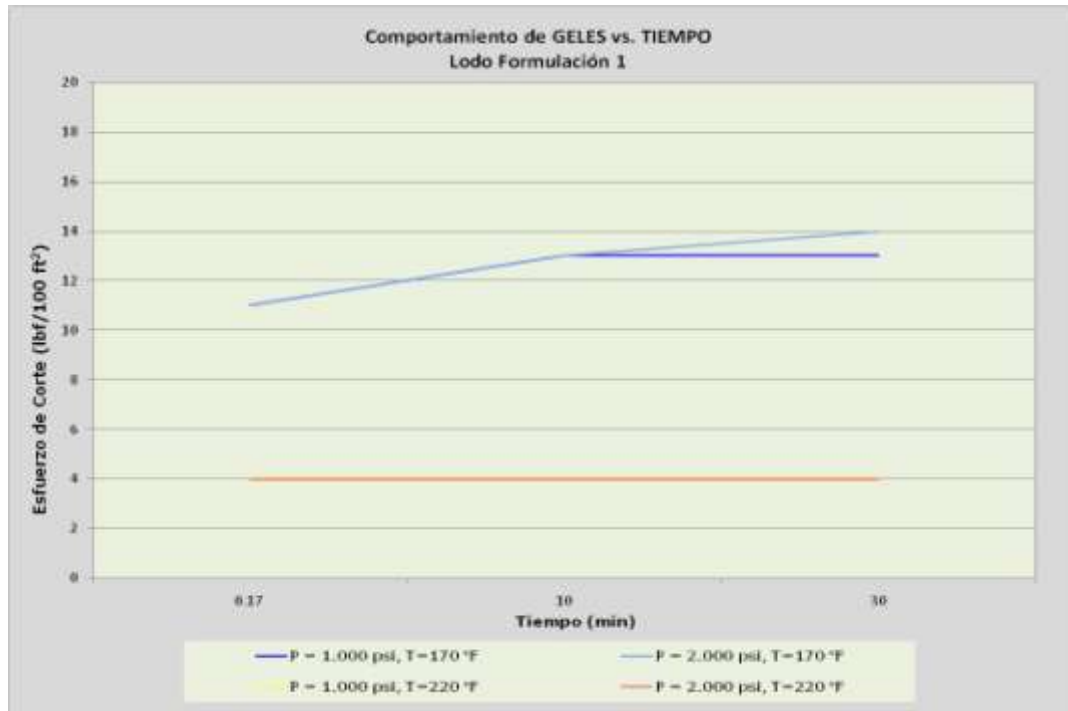


Tabla 12. Reología HTHP Lodo Formulación 1 + 8lpb de Biomasa.

LODO FORMULACIÓN 1 + 8 LPB DE BIOMASA												
T (°F)	P (psi)	RPM						Geles			VP (cp)	YP (lb/100 ft ²)
		600	300	200	100	6	3	10 seg	10 min	30 min		
170	1000	162	109	87.8	61.6	17	12	12	13	14	53	55.7
170	2000	164	110	89.1	62.4	17	12	12	13	14	53.9	56.4
220	1000	109	74.3	59.3	41	9	6	5	5	5	35	39.3
220	2000	109	74.2	59.2	40.9	9	6	6	5	5	34.3	39.9

Figura 28. Esfuerzo de Corte vs RPM Lodo Formulación 1 + 8lpb de Biomasa HTHP

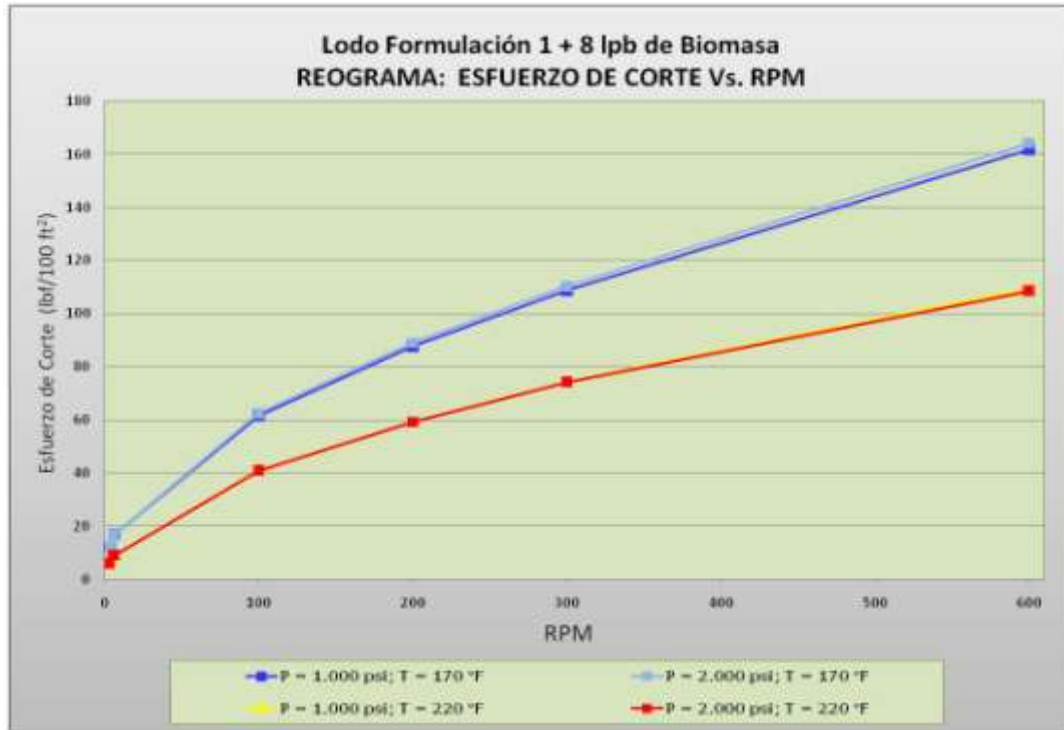


Figura 29. Geles vs Tiempo Lodo Formulación 1 + 8lpb de Biomasa HTHP

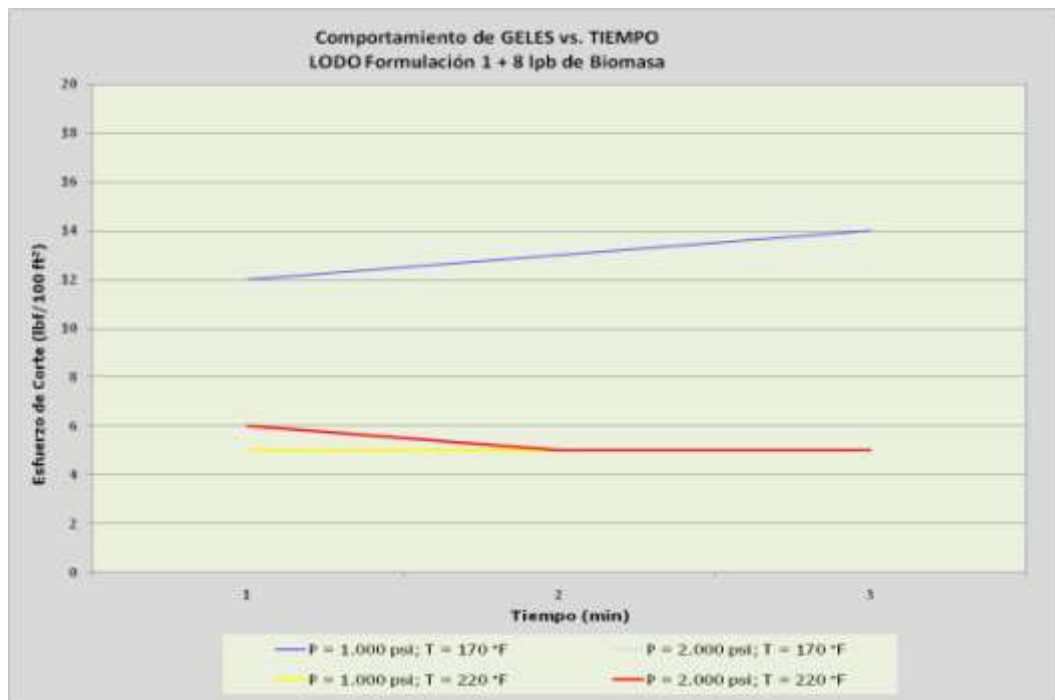


Tabla 13. Reología HTHP Lodo Formulación 2.

LODO FORMULACIÓN 2												
T (°F)	P (psi)	RPM						Geles			VP (cp)	YP (lb/100 ft ²)
		600	300	200	100	6	3	10 seg	10 min	30 min		
170	1000	134	94.8	77.3	55.4	15	11	11	12	13	39.6	55.2
170	2000	138	97	79.1	56.5	15	11	11	13	13	41.2	55.8
220	1000	90.5	62.6	49.9	34.1	6.6	4	3	3	3	27.9	34.7
220	2000	91.8	63.5	50.6	34.6	6.7	4	4	3	3	28.3	35.2

Figura 30. Esfuerzo de Corte vs RPM Lodo Formulación 2 HTHP

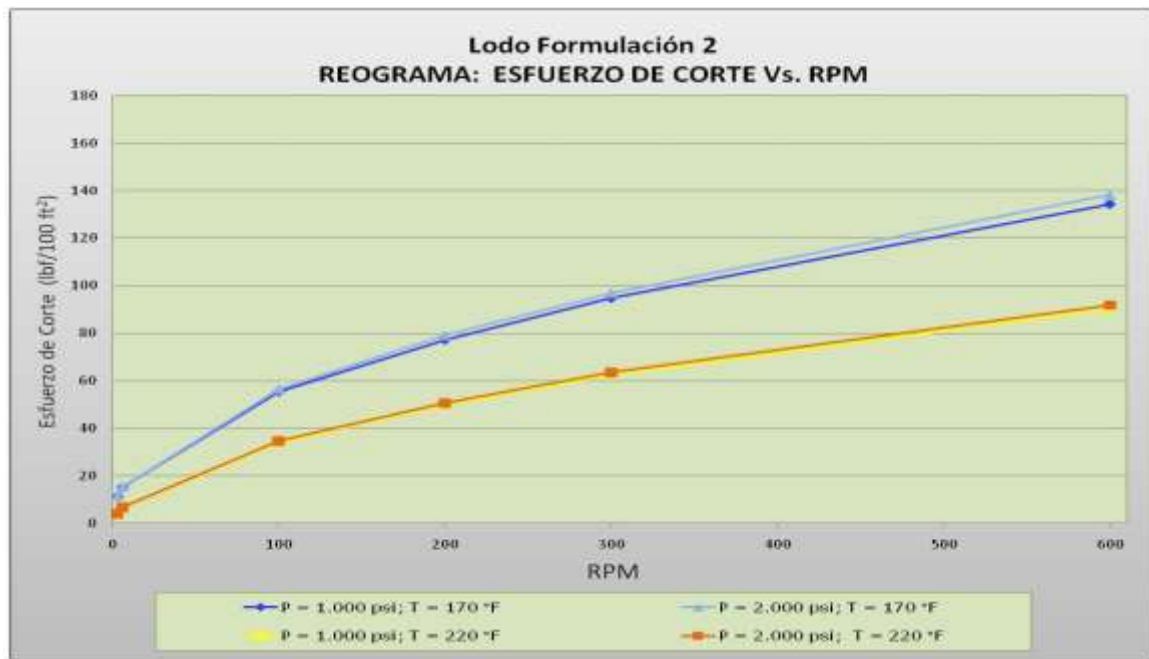
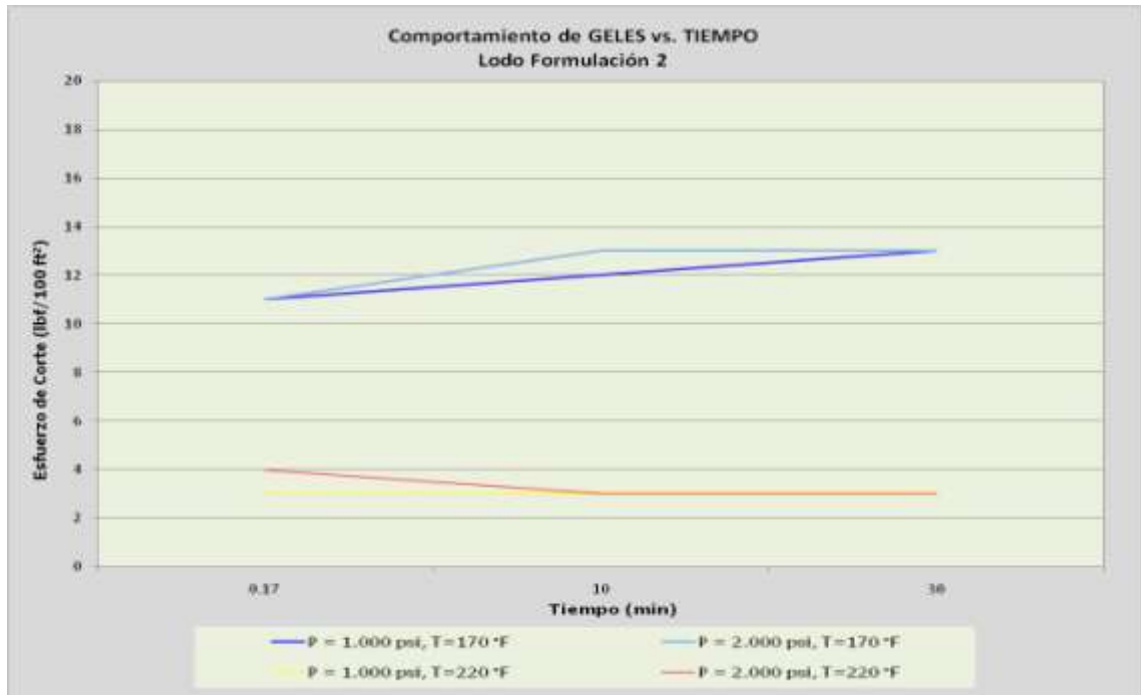


Figura 31. Geles vs Tiempo Lodo Formulación 2 HTHP



3.5.3 EVALUACIÓN DEL PH

Se tomaron las dos muestras del fluido de perforación y se tomaron las lecturas del pH por 21 días aproximadamente. A continuación se muestra como la Biomasa afecta la basicidad del fluido de perforación en comparación con el lodo de la formulación 1.

Tabla 14. Lecturas del pH durante 21 días

Fecha	Lodo F 1	Lodo F 1+ 8 lpb biomasa
09/11/2011	9,01	9,01
10/11/2011	8,92	8,59
11/11/2011	8,79	7,76
11/11/2011	8,61	7,74
15/11/2011	8,47	7,63
16/11/2011	8,43	7,58
17/11/2011	8,39	7,49
18/11/2011	8,33	7,33
23/11/2011	8,3	7,13
24/11/2011	8,22	6,67
25/11/2011	8,17	6,59
28/11/2011	8,03	6,51
29/11/2011	8,02	6,49
30/11/2011	8,02	6,33

Fuente: Autor

Figura 32. Muestra de la Formulación 1+ 8 lb de Biomasa seca después de los 21 días de seguimiento de pH



Fuente: Autor

Figura 33. Formulación 1 después de los 21 días de seguimiento de pH



Fuente: Autor

3.5.4 BIODEGRADABILIDAD

Se realizaron pruebas en el laboratorio de biotecnología de análisis elemental y biodegradabilidad a la biomasa seca:

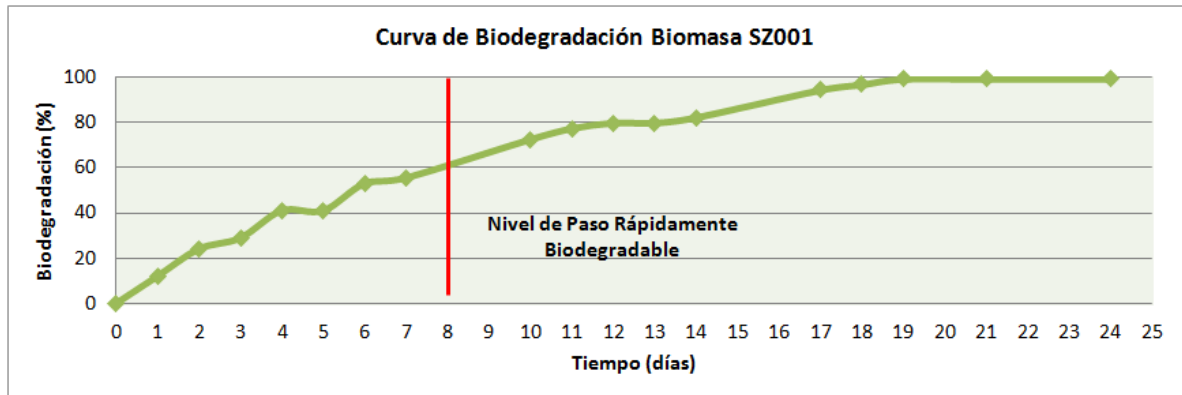
Figura 34. Composición de la Biomasa seca de algas

Carbono Orgánico Total: 38.8%
Nitrógeno total: 1.378%
Lípidos: 10.07%
Carbohidratos totales: 53.71%
Proteína: 26.57%
Azúcares Reductores: 2.37%

3.5.4.1 HALLAZGOS

- La cantidad de azúcares reductores es muy pequeña respecto a la cantidad de carbohidratos. La mayoría de la biomasa no está constituida por monómeros sino por azúcares complejos y para su fermentación es necesaria un hidrólisis.
- El porcentaje de proteína es considerable para aplicaciones alimenticias y podría realizarse a futuro una caracterización más detallada del perfil amino-ácido de la biomasa para determinar su uso puntual.

Figura 35. Curva de Biodegradación Biomasa seca



El compuesto se clasifica como rápidamente biodegradable. La norma OCDE301C establece que un compuesto debe alcanzar el 60% de degradación en 28 días; la biomasa estudiada lo alcanzó a los 8 días de análisis.

La cantidad de N total (1.38%) en la muestra es considerada baja; esto facilita su biodegradabilidad (conversión a CO₂ y agua) y es considerado como indicador de NO favorecimiento a fenómenos de nitrificación.

3.5.5 Eco-TOXICIDAD

Se realizaron pruebas en el laboratorio de refinación y transporte para la identificación de peligro potencial para el medio acuático de biomasa algal haciendo uso de una batería de ensayos (*scenedesmus acutus*(alga), *daphnia pulex*(camarón), , *artemia franciscana*(camarón marino) y *oreochormis sp* (pez).(Figura 36)

Figura 36. Microorganismos utilizados



La muestra identificada como Biomasa de algas-SZ 001 fue clasificada como **No peligrosa para el medio acuático**, según en la Directiva 67/548/CEE del consejo de la Comunidad Económica Europea relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas.

La toxicidad aguda está definida como una respuesta física severa y rápida de los organismos a un estímulo. Este estímulo se manifiesta en general en un intervalo de 0 a 96 horas y se mide como la concentración letal media (CL50) o la concentración efectiva media (CE50). La concentración letal media mide la cantidad de compuesto necesaria para que el 50% de los organismos muera

después de una exposición corta (máximo 96h). La concentración efectiva por su parte se diferencia de la concentración letal en que la respuesta física no es la muerte, y se puede ver manifestada como inhibición del crecimiento (algas).

Tabla 15. Clasificación de toxicidad de la Biomasa seca

Identificación	Tipo	S. acutus	D. pulex	A. franciscana	Oreochromis Sp	Identificación de peligro	PNEC (mg/l)
		CE ₅₀ ^{72h} (mg/l)	CL ₅₀ ^{48h} (mg/l)	CL ₅₀ ^{48h} (mg/l)	CL ₅₀ ^{96h} (mg/l)		
Biomasa de Algas-SZ 001	Solido	5897	658.1	2157	13258	—	0.6581

Tabla 16. Clasificación de toxicidad de sustancias peligrosas

Toxicidad Aguda (CE ₅₀ mg/l)	Código Clasificación	Frase de riesgo
≤1	R50	Muy Tóxica para el medio acuático
1-10	R51	Tóxica para el medio acuático
10-100	R52	Nociva para el medio acuático
≥100	--	No Peligrosa para medio acuático

3.6 DAÑO A LA FORMACIÓN

3.6.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE GARGANTA DE POROS Y PRESIÓN CAPILAR POR INYECCIÓN DE MERCURIO

El análisis de presión capilar por inyección de mercurio por drenaje permite calcular la distribución de tamaños de garganta de poros en muestras de roca, ya sea de aspecto homogéneo, heterogéneo, consolidadas e inconsolidadas, como también muestras en polvo y catalizadores.

Esta técnica permite determinar cómo es (homogénea o heterogénea) la distribución del tamaño de garganta de poros de las muestras analizadas, la saturación residual del fluido mojante; en este caso aire, además nos permite conocer su porosidad y la densidad aparente o skeletal.

El procedimiento técnico de ensayo para presión capilar por el método de inyección de mercurio describe los pasos para desarrollar la curva de presión capilar contra saturación de aire usando la técnica de inyección de mercurio. Adicionalmente, a partir de los datos de presión capilar, se desarrolla la distribución de diámetro de poros de la roca.

La prueba se llevó a cabo por el método de inyección de mercurio, utilizando el porosímetro de intrusión y extrusión de mercurio AUTOPORE IV 9500, el cual está equipado con cuatro cámaras de baja presión, donde básicamente se realiza el llenado del portamuestras con el mercurio y se determinan los primeros puntos de presión capilar de la muestra. Cuenta también con dos cámaras de alta presión donde se efectúa la inyección de mercurio hasta una presión de 60.000 psi, para evaluar el resto de la curva de presión capilar y la porosidad.

Se siguió el Procedimiento Técnico de Ensayo UST-147-021, el cual esta

soportado por la norma ASTM D 4404-10 y ajustado al procedimiento de operación del equipo ICP-PTO-147-013.

Se seleccionaron en total cuatro (4) muestras de plug del pozo Castilla N-A de la formación Guadalupe K2, las cuales se identifican a continuación en la Tabla 17 con sus propiedades petrofísicas básicas.

Tabla 17. Propiedades petrofísicas básicas de las muestras

Profundidad (Pies)	Presión Confinamiento (Psi)	Porosidad (%)	Densidad Granos (g/c.c.)	Permeabilidad Klinkenberg (mD)
Castilla N-A Formación Guadalupe K2				
7716.50'	800	22.2	2.683	1654
7737.50'	800	20	2.713	1680
7820.50'	800	20	2.689	1564
7830.50'	800	20.3	2.682	1606

A las muestras seleccionadas se les determinó presión capilar y la distribución del tamaño de garganta de poros por el método de inyección de mercurio a condiciones de temperatura ambiente y presión hasta 60.000 psi.

De acuerdo a la distribución del tamaño de garganta de poros, se observa que todas las muestras de este pozo presentan un comportamiento muy homogéneo, con valores de diámetro (moda) de garganta de poros entre 40.81 y 75.68 micrones. Ver Tabla de resultados 18 y Figuras 37, 38, 39 y 40.

De acuerdo a la tendencia de las curvas de presión capilar, se observa que todas las muestras de plug del pozo Castilla N-A presentan muy bajas saturaciones residuales de aire a 2400 psi con valores entre 0.07% y 0.47%, lo cual indica que todas estas muestras tienen una facilidad para drenar el fluido mojante.

El resumen de los resultados obtenidos de las pruebas de presión capilar y tamaño de garganta de poros por inyección de mercurio, para todas las cuatro muestras se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de las pruebas de presión capilar por inyección de mercurio

Profundidad (Pies)	Porosidad Iny. Hg (%)	Densidad Skeletal (g/ml)	Diámetro Moda (Micras)	Sat. Aire @ 2400 psi (%)
Castilla N-A Formación Guadalupe K2				
7716.50'	20.52	2.6572	40.81	0.07
7737.50'	20.26	2.6468	40.84	0.03
7820.50'	20.38	2.7765	75.68	0.47
7830.50'	20.12	2.6421	52.96	0.04

Figura 37. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7716.50'

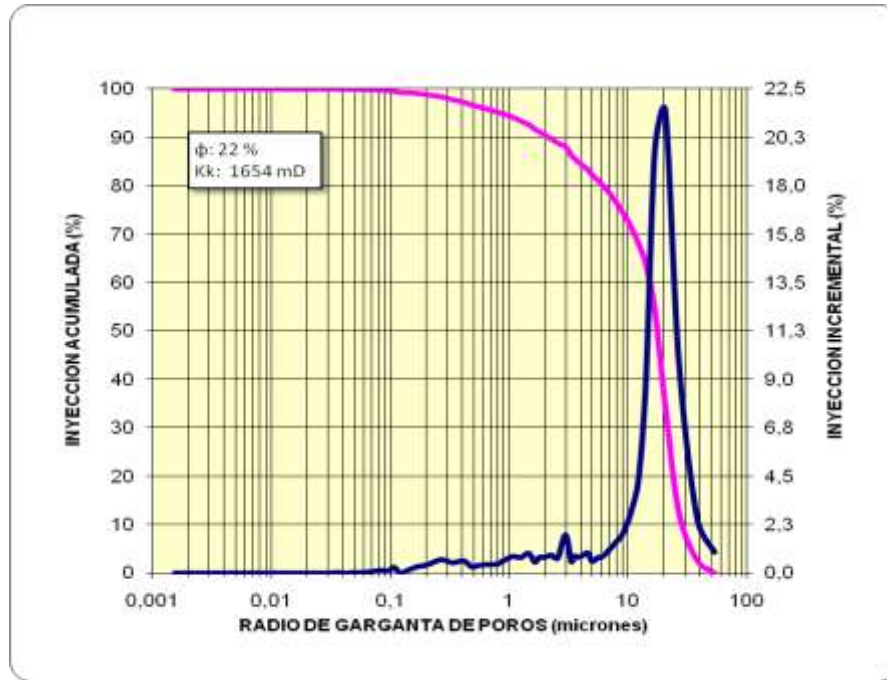


Figura 38. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7737.50'.

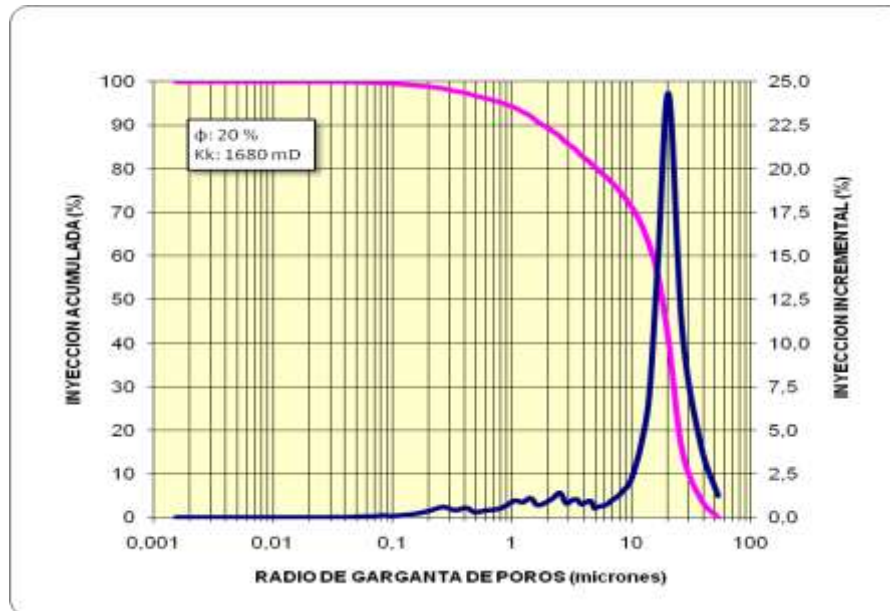


Figura 39. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7820.50'

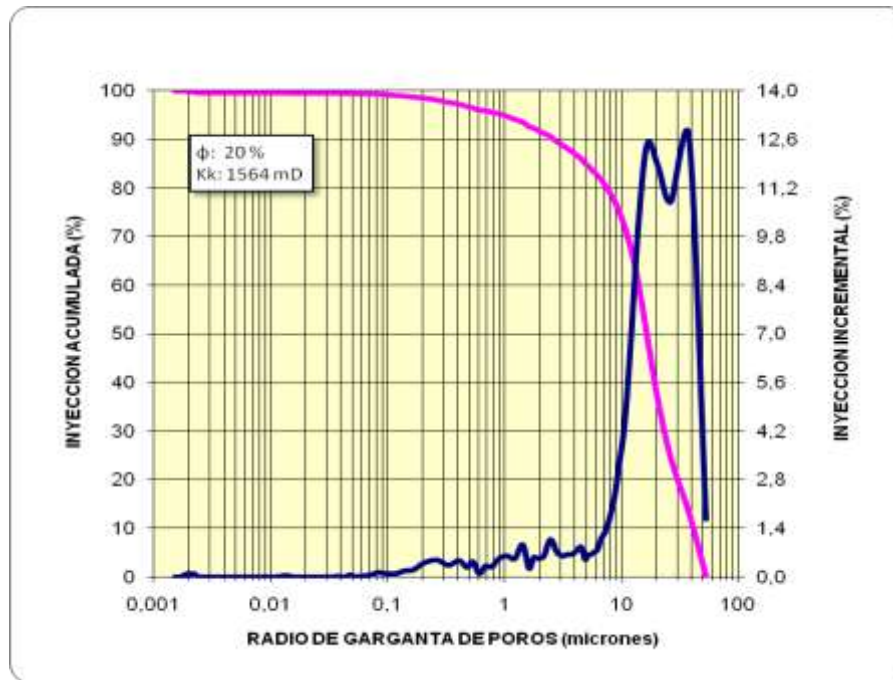


Figura 40. Distribución de Tamaño de Garganta de Poros Prof. 7830.50'

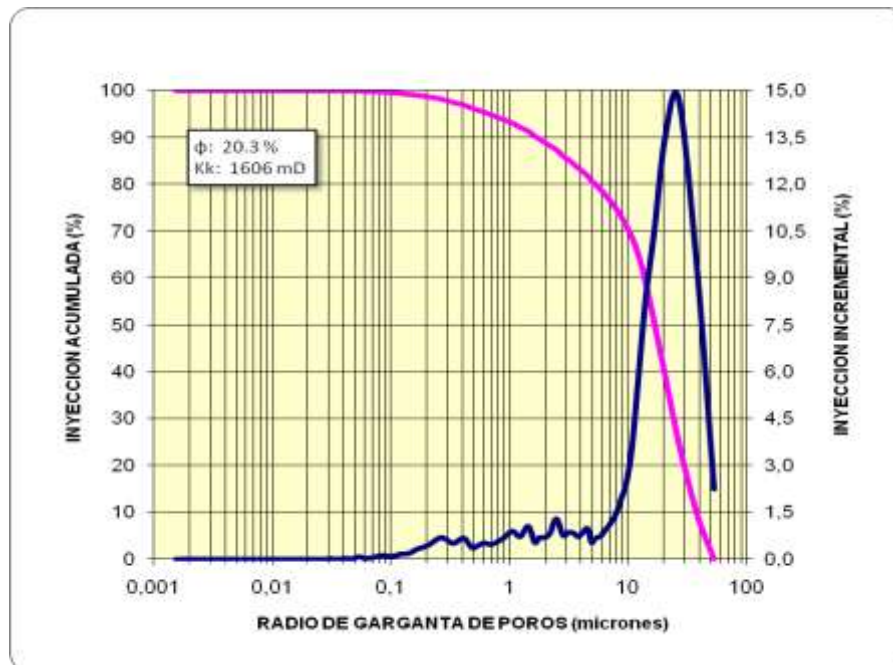
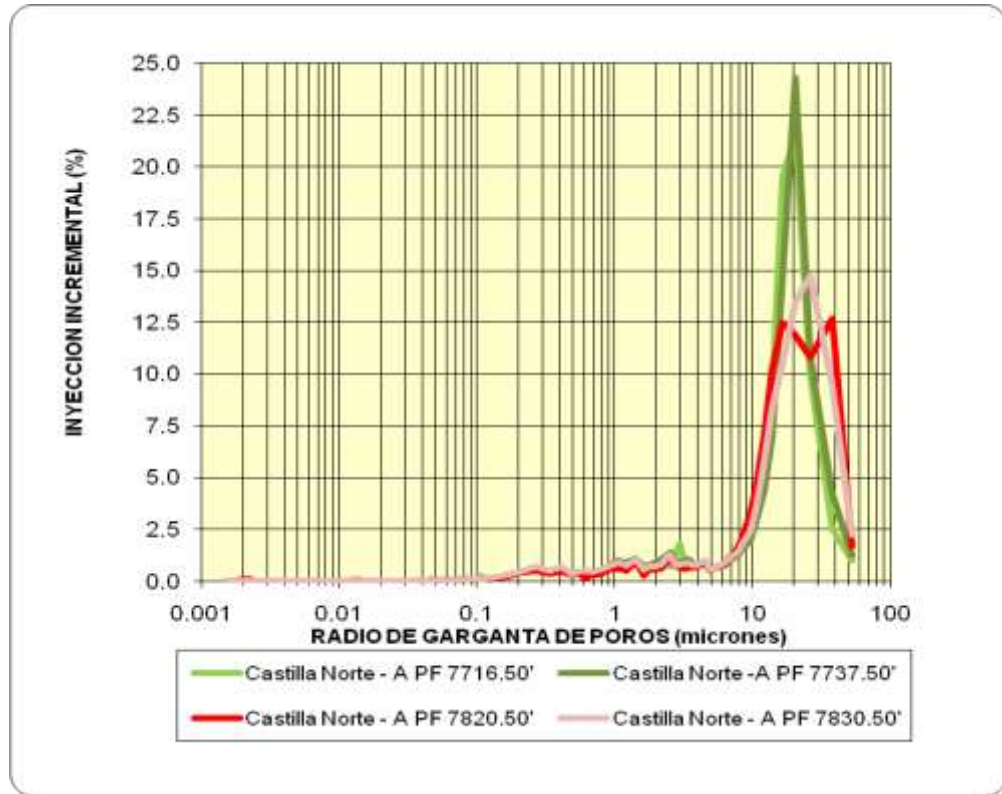


Figura 41. Unión de la distribución de Tamaño de Garganta de Poros



3.6.2 FILTRACIÓN ESTÁTICA (PPT) PARA CASTILLA NORTE-A TAPONAMIENTO POR PARTÍCULAS

Se basa en la cantidad de filtrado que invade la zona productora, así como la tasa de invasión que este realiza en condiciones estáticas, se determinó en la celda PPT en una filtro-prensa HPHT. Se utilizaron discos de cerámica de 20, 40 y 55 micrones al mercurio (Hg), según la relación y el ajuste de los resultados arrojados por la prueba de tamaño de garganta por inyección de mercurio de los plugs del pozo del campo Castilla Norte-A .

La temperatura de evaluación fue de 200 °F y las presiones de 50 psi de contrapresión, con un diferencial de presión de 1000 psi. Esta prueba se realiza bajo los parámetros recomendados en la Norma API 13 B-2.

El filtrado PPT se realiza para la primera formulación y segunda formulación con las diferentes adiciones de Biomasa seca, la formulación 3 tiene un comportamiento similar a la formulación 2, por esto solo se realizan estas dos formulaciones para hacer un comparativo en su comportamiento, ya que la formulación 2 contiene grafito que tiene como función sellar microfracturas y puentear en la cara de la formación.

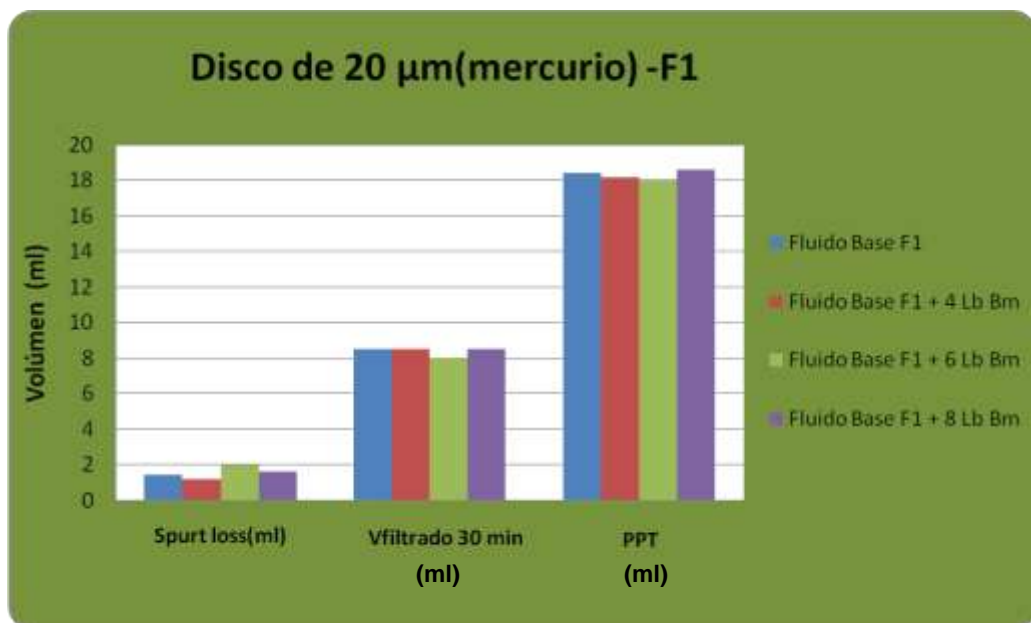
A continuación se presentan los resultados de la prueba de filtrado, se inicia con la formulación 1 y su respectiva comparación con las adiciones de Biomasa seca.

Tabla 19. Filtrado en un Disco de 20 micrones al mercurio

FILTRADO PPT PARA CASTILLA NORTE-A DISCO 20 MICRONES (Hg)			
Disco de 20 micrones (Hg)	Spurt loss(ml)	V filtrado 30 min(ml)	PPT(ml)
Fluido Base F1	1,4	8,5	18,4
Fluido Base F1 + 4 Lb Bm	1,2	8,5	18,2
Fluido Base F1 + 6 Lb Bm	2	8	18
Fluido Base F1 + 8 Lb Bm	1,6	8,5	18,6

Fuente: Autor

Figura 42. Volumen de filtrado en un Disco de 20 micrones al mercurio



Fuente: Autor

Figura 43. Formulación 1 en Disco de 20 μm



Fuente: Autor

Figura 44. Formulación 1+ 4 lb Biomasa en Disco 20 μm



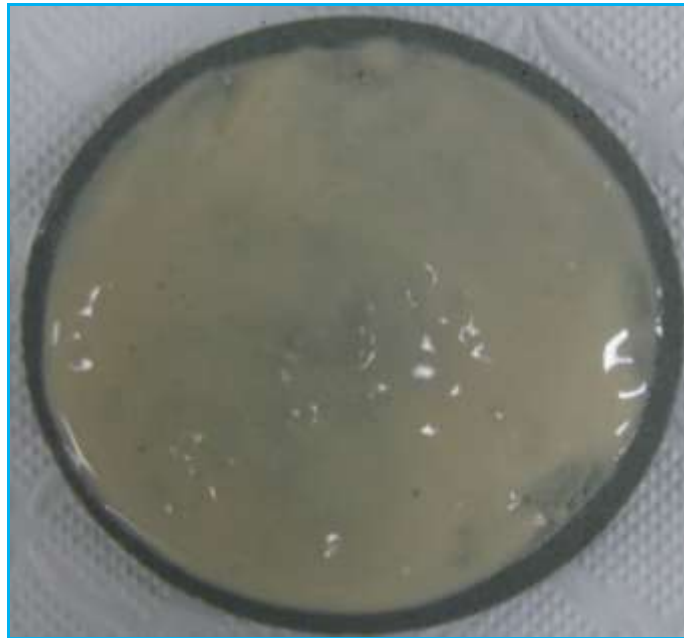
Fuente: Autor

Figura 45. Formulación 1+ 6 lb Biomasa en Disco de 20 μ m



Fuente: Autor

Figura 46. Formulación 1+ 8 lb Biomasa en Disco de 20 μ m



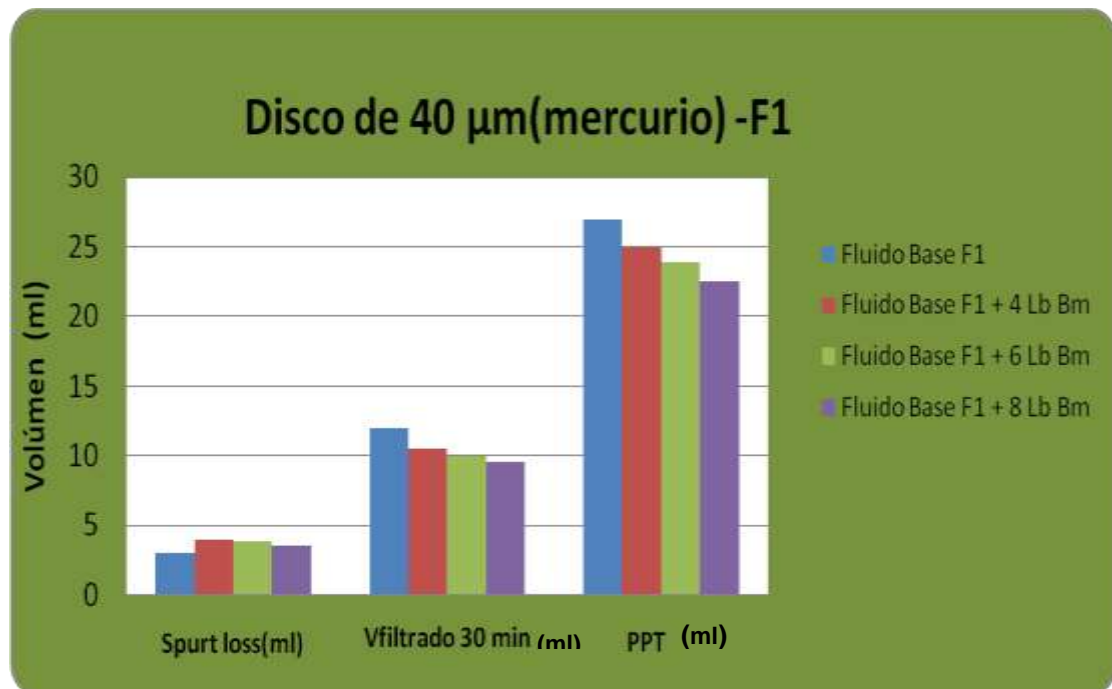
Fuente: Autor

Tabla 20. Filtrado en un Disco de 40 micrones al mercurio

FILTRADO PPT PARA CASTILLA NORTE-A DISCO 40 MICRONES (Hg)			
Disco de 40 micrones (Hg)	Spurt loss(ml)	Vfiltrado 30 min(ml)	PPT(ml)
Fluido Base F1	3	12	27
Fluido Base F1 + 4 Lb Bm	4	10,5	25
Fluido Base F1 + 6 Lb Bm	3,9	10	23,9
Fluido Base F1 + 8 Lb Bm	3,5	9,5	22,5

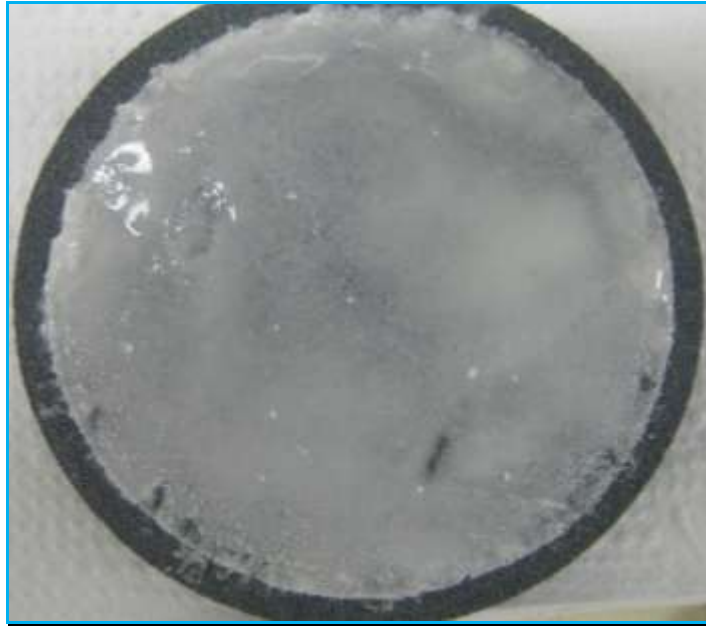
Fuente: Autor

Figura 47. Volumen de filtrado en un Disco de 40 micrones al mercurio



Fuente: Autor

Figura 48. Formulación 1 en Disco de 40 μm



Fuente: Autor

Figura 49. Formulación 1 + 4 lb Biomasa en Disco de 40 μm



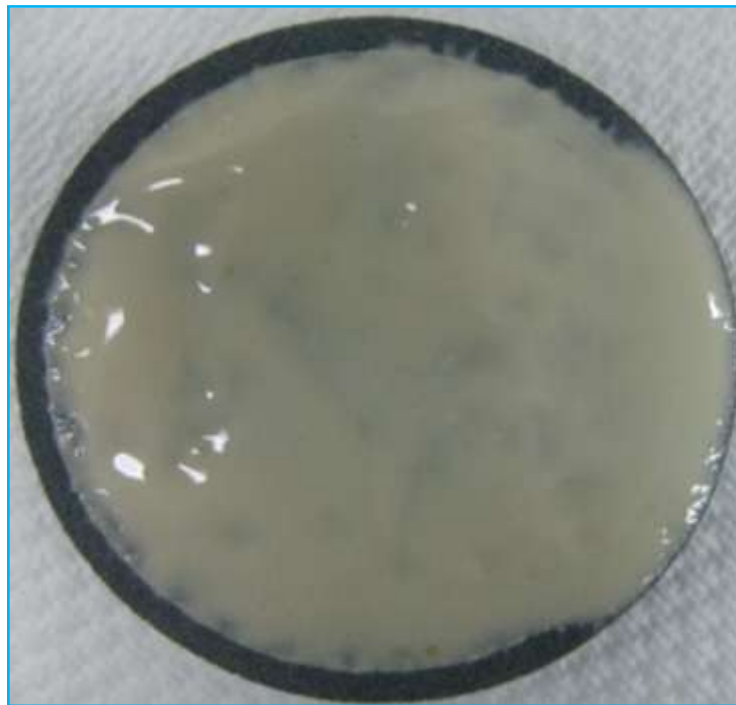
Fuente: Autor

Figura 50. Formulación 1 + 6 lb Biomasa en Disco de 40 μm



Fuente: Autor

Figura 51. Formulación 1 + 8 lb Biomasa en Disco de 40 μm



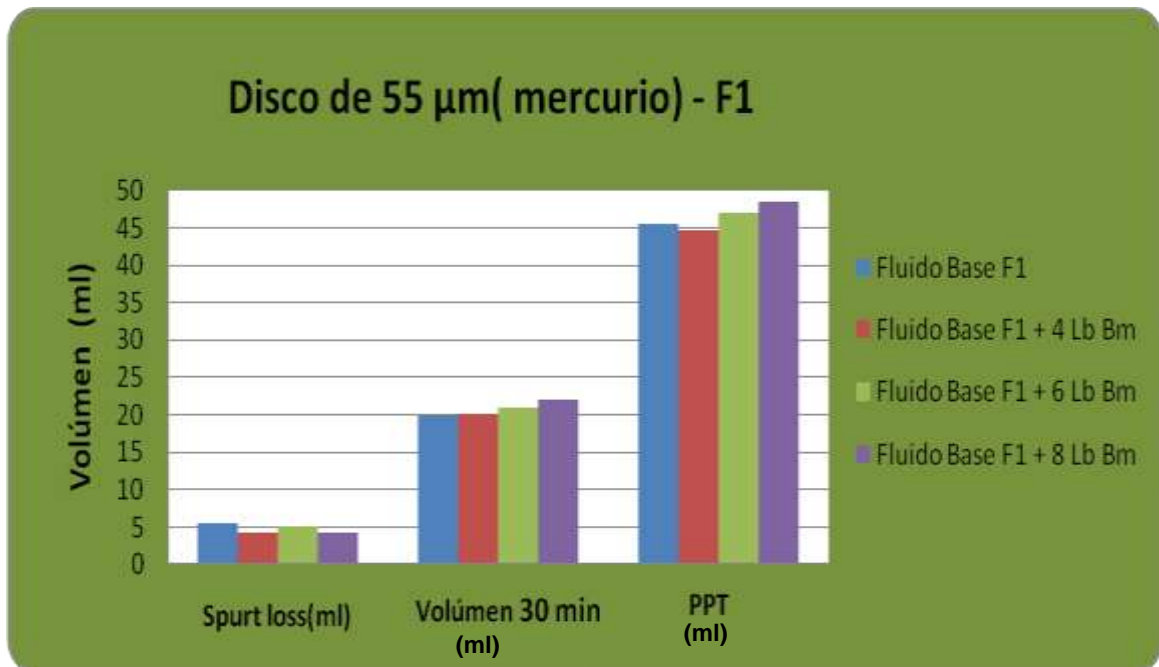
Fuente: Autor

Tabla 21. Filtrado en un disco de 55 micrones al mercurio

FILTRADO PPT PARA CASTILLA NORTE-A DISCO 55 MICRONES (Hg)			
Disco de 55 micrones(Hg)	Spurt loss(ml)	Vfiltrado 30 min(ml)	PPT(ml)
Fluido Base F1	5,6	20	45,6
Fluido Base F1 + 4 Lb Bm	4,3	20,2	44,7
Fluido Base F1 + 6 Lb Bm	5,1	21	47,1
Fluido Base F1 + 8 Lb Bm	4,2	22,1	48,4

Fuente: Autor

Figura 52. Volumen de filtrado en un disco de 55 micrones al mercurio



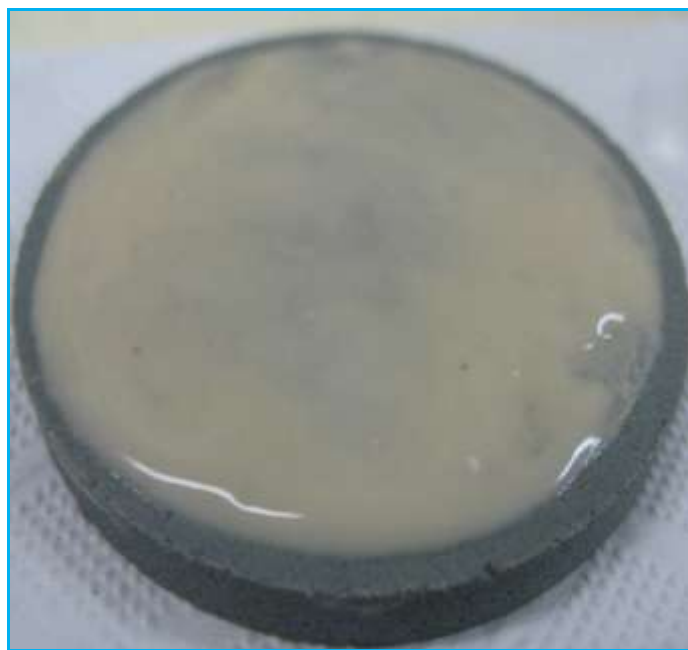
Fuente: Autor

Figura 53. Formulación 1 en Disco de 55 μm



Fuente: Autor

Figura 54. Formulación 1 + 4 lb Biomasa en Disco de 55 μm



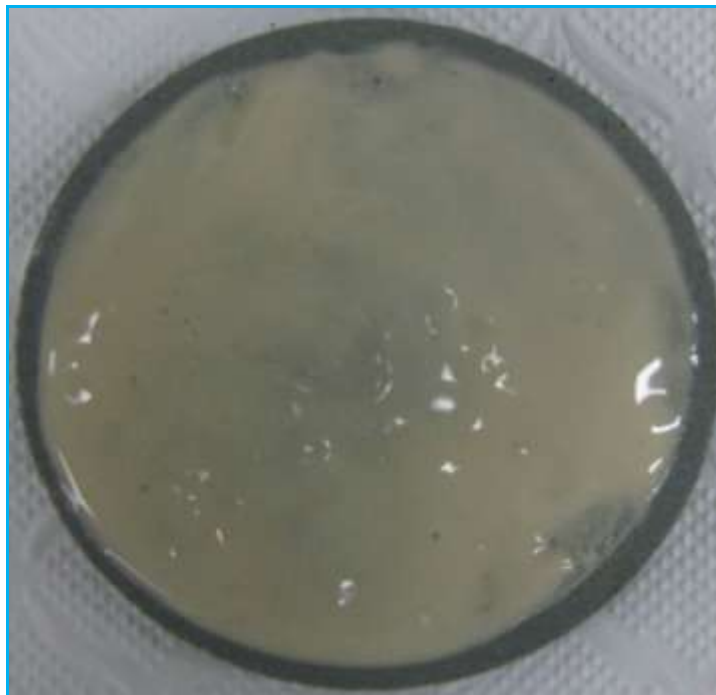
Fuente: Autor

Figura 55. Formulación 1 + 6 lb Biomasa en Disco de 55 μ m



Fuente: Autor

Figura 56. Formulación 1 + 6 lb Biomasa en Disco de 55 μ m



Fuente: Autor

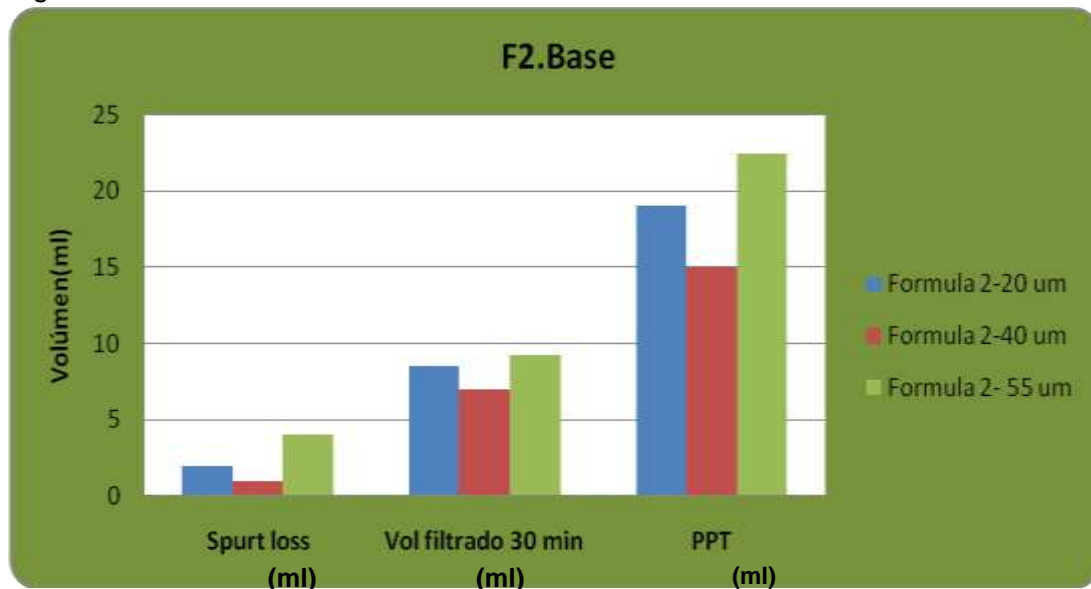
En la siguiente tabla se muestran los resultados de la formulación 2 y se observa el comportamiento del grafito, que cumple la función de material de puenteo.

Tabla 22. Filtrado de la Formulación 2 Base

FILTRADO PPT PARA CASTILLA NORTE-A			
Fluido evaluado	Formula 2 BASE		
	20 μm	40 μm	55 μm
Disco μm (Hg)			
Spurt loss(ml)	2	1	4
Vol. filtrado 30 min(ml)	8,5	7	9,2
PPT(ml)	19	15	22,4

Fuente: Autor

Figura 57. Volumen de filtrado de la formulación 2



Fuente: Autor

3.6.2.1 OBSERVACIONES DE LA PRUEBA DE FILTRADO HTHP :

En comparación con los resultados encontrados en la formulación 2 y un disco de 40 μm , con la formulación 1 y sus adiciones respectivas de biomasa, se logra obtener un promedio del mismo comportamiento con el resultado de la formulación

1 y el disco de 40 μm con una adición de 8 lpb de biomasa (no es tan bajo como los resultados arrojados en la formulación 2).

3.6.3 ANÁLISIS SEM ANTES DEL DAÑO A LA FORMACIÓN

Este estudio se realizó con el microscopio electrónico Leo 1450VP, equipado con sistema de rayos X por energía dispersa OXFORD INCA, operado en el modo alto vacío. Se trabajó sobre las muestra, sin moler recubiertas con oro. Las imágenes observadas se obtuvieron usando detector de electrones secundarios (SE) y detector de electrones retrodispersos (BSE), los contrastes de intensidad que se observan en el modo SE dependen principalmente de la morfología de la muestra, su interpretación es similar a la del objeto visto por encima con iluminación lateral.

Las alturas de los picos en los espectros pueden interpretarse de manera preliminar como reflejo de la abundancia relativa de estos elementos en la parte analizada, sin embargo su interpretación cuantitativa está sujeta a una serie de fenómenos que se presentan en la muestra por la interacción de los rayos X con ella y por la probabilidad de ocurrencia de la emisión característica de cada elemento.

Para las muestras se presenta una imagen de baja ampliación con el fin de mostrar la morfología general, se presentan también imágenes más ampliadas de zonas de interés, junto con el análisis de composición elemental en la zona analizada. En la parte inferior de las micrografías, junto con la identificación de la muestra y algunos parámetros de operación del microscopio, aparece la línea de escala con la cual puede estimarse el tamaño de las zonas de interés, mm simboliza milímetros y μm micrómetro.

Siguiendo el Procedimiento Técnico General UST-154-P-304 y el Procedimiento Técnico de Ensayo UST-154-P-0006. Este estudio se realizó con el microscopio electrónico de barrido LEO 1450VP y el detector de rayos Oxford - Prime.

Para la muestra se adquieren imágenes y análisis de composición elemental a baja ampliación y series de imágenes a mayores ampliaciones, con el fin de tener información sobre el tipo de roca, su microtextura y la morfología y distribución de algunos minerales que pueden identificarse por su aspecto y composición elemental. La descripción se basa inicialmente en la textura, el tamaño de grano promedio, la composición mineralógica y en conceptos generales de rocas sedimentarias. Se consideran también cuando son aplicables los conceptos de Arcilla laminar, Arcilla estructural y Arcilla dispersa que pueden apoyar la interpretación del comportamiento petrofísico.

Como arcilla laminar se tipifican láminas de arcilla de origen detrítico localizadas entre los granos de arena, que han sufrido tensión mecánica durante la compactación. Las arcillas laminares pueden afectar la porosidad dependiendo de su ubicación en el espacio poral, cuando recubren los granos su efecto es menor que cuando se encuentran rellenando los poros o en los intersticios de los granos.

Como arcilla estructural se consideran granos formados por agregados de partículas de arcilla que toman el lugar de granos del armazón de la roca y no afectan de manera considerable la porosidad.

Como Arcilla dispersa se describe la arcilla ubicada en el espacio poral que puede actuar como cemento o como matriz. La influencia de las arcillas dispersas depende del tipo de mineral arcilloso. Estas arcillas adquieren tres tipos de distribución, descritas como: 1. “pore filling”: rellenando poros, 2. “pore lining”: capa que recubre las paredes de los granos, 3: “pore bridging”: haciendo puentes

en el espacio poral. De este grupo haría parte lo que se describe petrográficamente como cemento arcilloso, que es de tipo autigénico y ocasionalmente la matriz arcillosa, que tiene un carácter más detrítico, pero que según su distribución, se incluye en este grupo.

3.6.3.1 CASTILLA NORTE-A, PROF.: 7716.50'

Arenisca cuarzosa con tamaño de grano principalmente medio y un sistema de poros despejado. Presenta arcilla principalmente tipo caolinita como relleno de poro, mineral tamaño arcilla junto a cristales de pirita ubicado entre granos. Minerales de titanio y pirita entre granos, cemento silicio y abundantes sobrecrecimientos de cuarzo que en algunas zonas disminuye el espacio poroso; mineral de zirconio entre la caolinita. A borde de grano se encontró residuos de posible lodo.

Figura 58. Aspecto general Prof.: 7716.50'

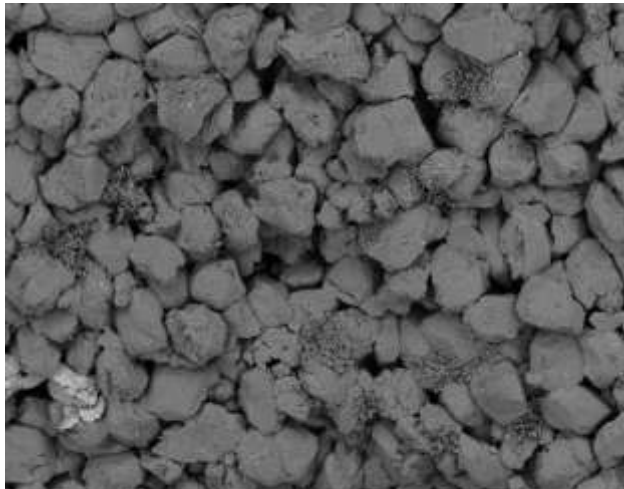


Figura 59. Composición general Prof.: 7716.50'

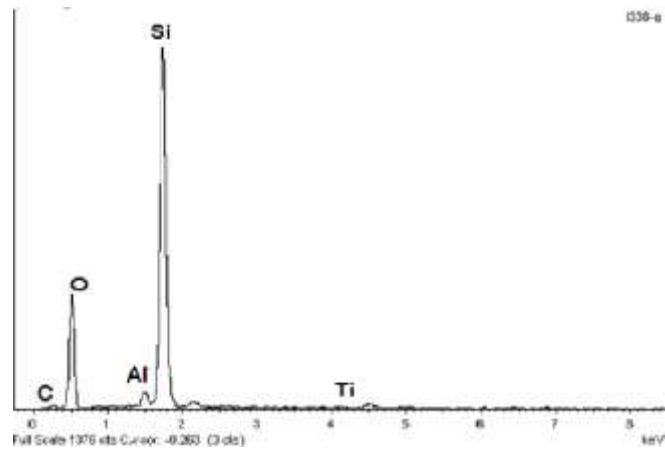


Figura 60. Detalle de poro despejado y sobrecrecimiento de cuarzo Prof.: 7716.50'

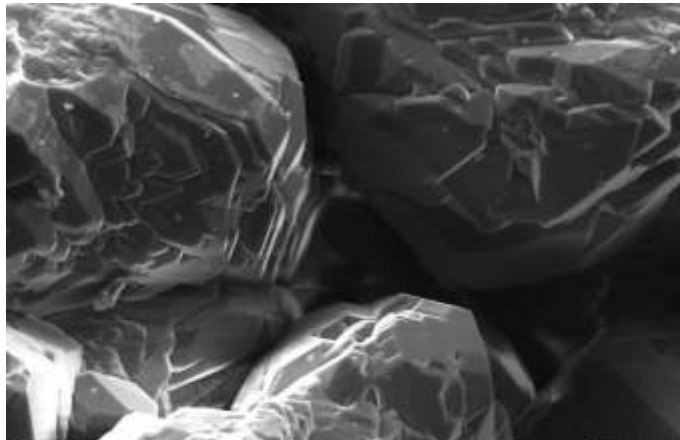


Figura 61. Caolinita como relleno de poro Prof.: 7716.50'

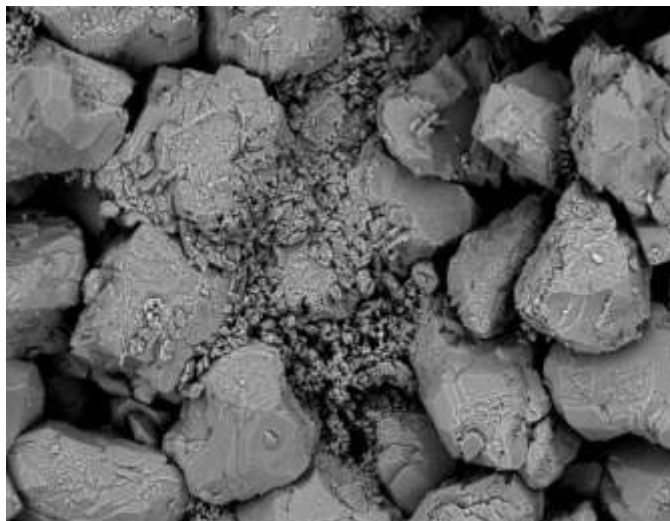


Figura 62. Detalle y Composición de la caolinita Prof.: 7716.50'

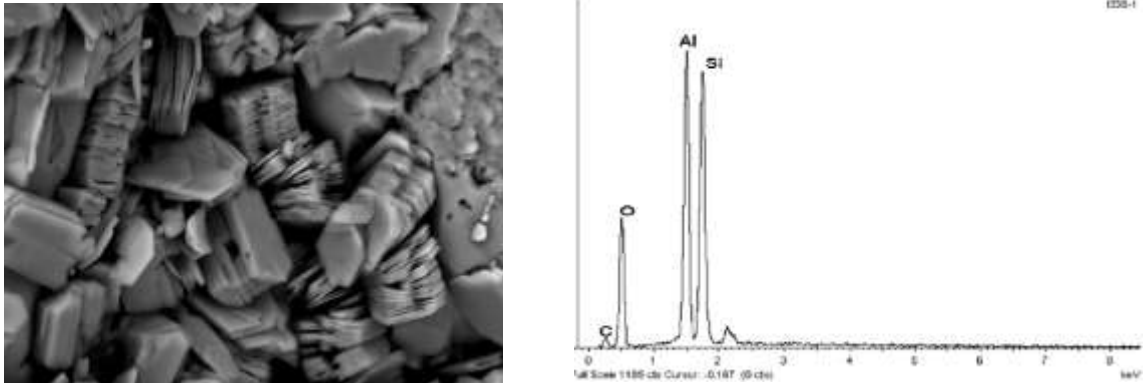


Figura 63. Mineral tamaño arcilla entre granos (Flecha) Prof.: 7716.50'

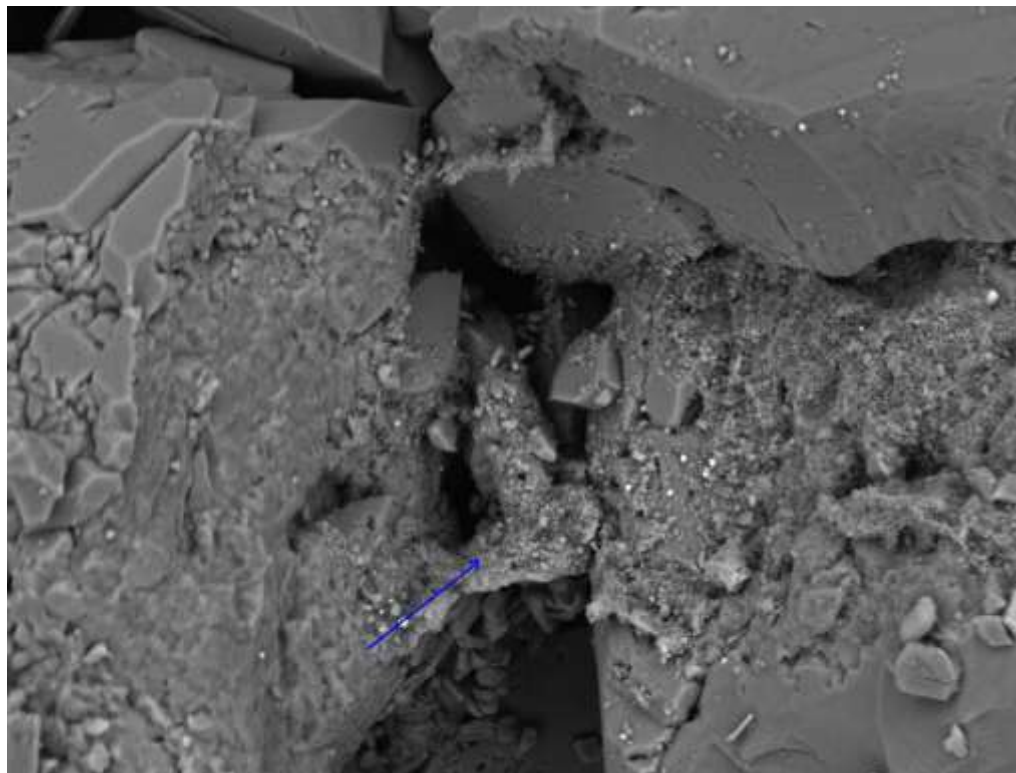


Figura 64. Detalle y Composición del mineral tamaño arcilla Prof.: 7716.50'

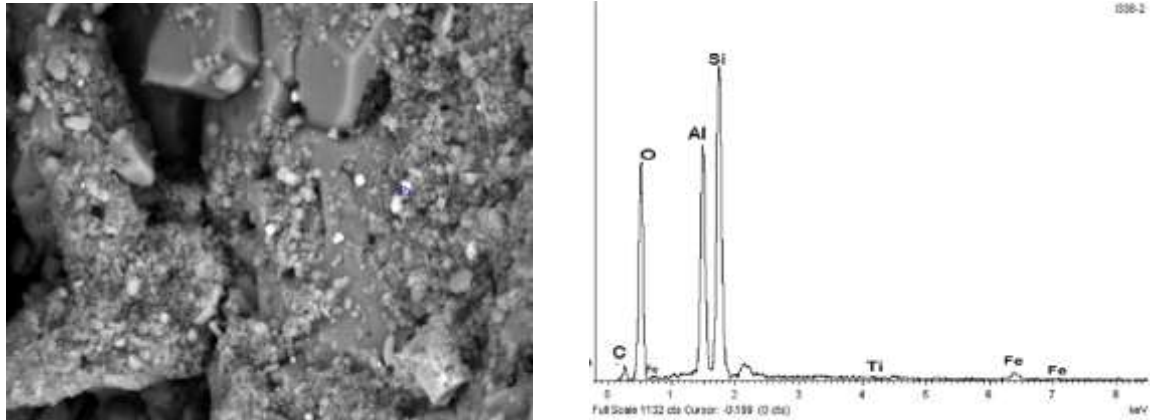
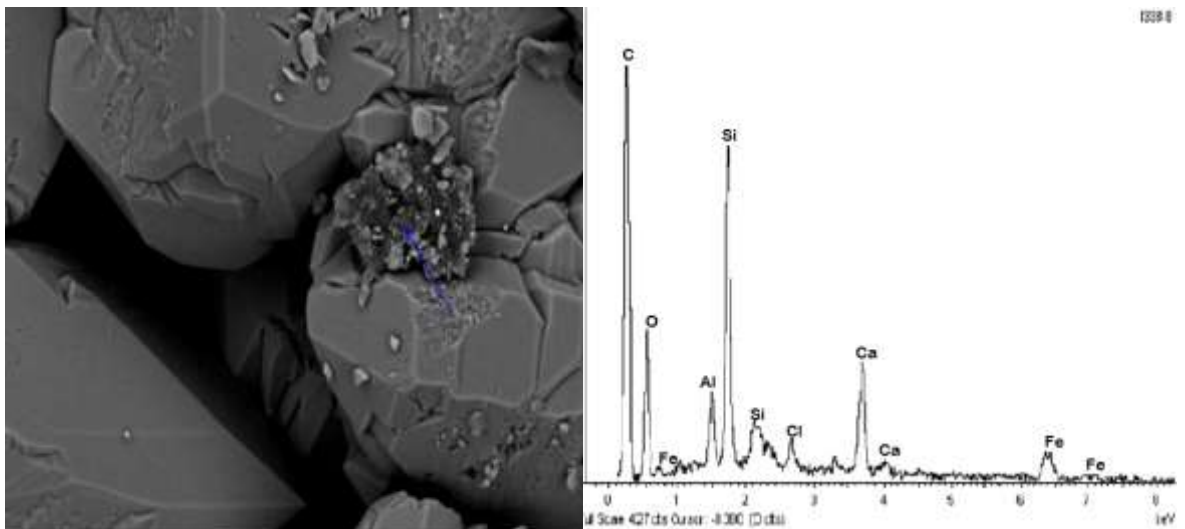


Figura 65. Detalle y Composición del residuo de posible lodo Prof.: 7716.50'



3.6.3.2 CASTILLA NORTE-A, PROF.: 7737.50'

Roca tipo arenisca con tamaño de grano medio y frecuentes poros despejados. Presenta arcilla tipo caolinita que se localiza como relleno parcial en poros y sobre granos en distinta formas como laminas sueltas y librillos, mineral tamaño arcilla sobre y entre granos, en algunos casos con composición similar a esmectita (O, Na, Al, Si, K, Fe), cemento silíceo y sobrecrecimiento de cuarzo. Se encontraron Minerales de titanio y minerales de fosforo y tierras raras.

Figura 66. Aspecto y Composición general Prof: 7737.50'

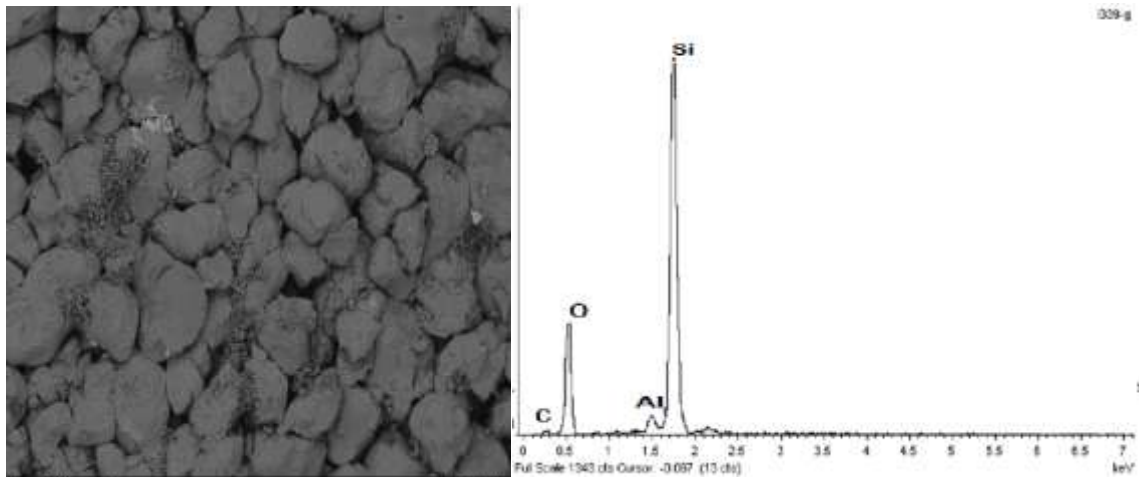


Figura 67. Detalle de poro despejado sobrecrecimiento de cuarzo Prof: 7737.50'

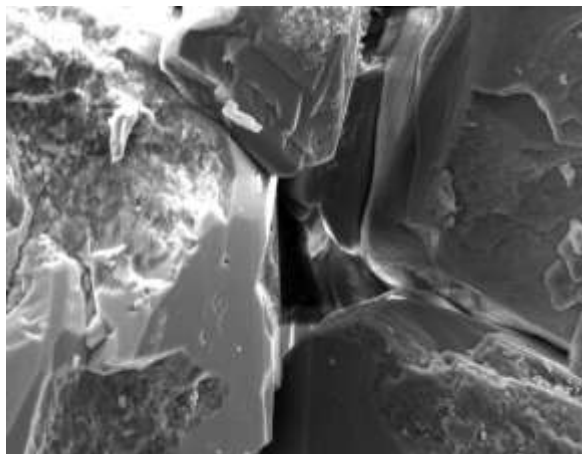


Figura 68. Mineral tamaño arcilla sobre y entre granos (Flecha) Prof: 7737.50'

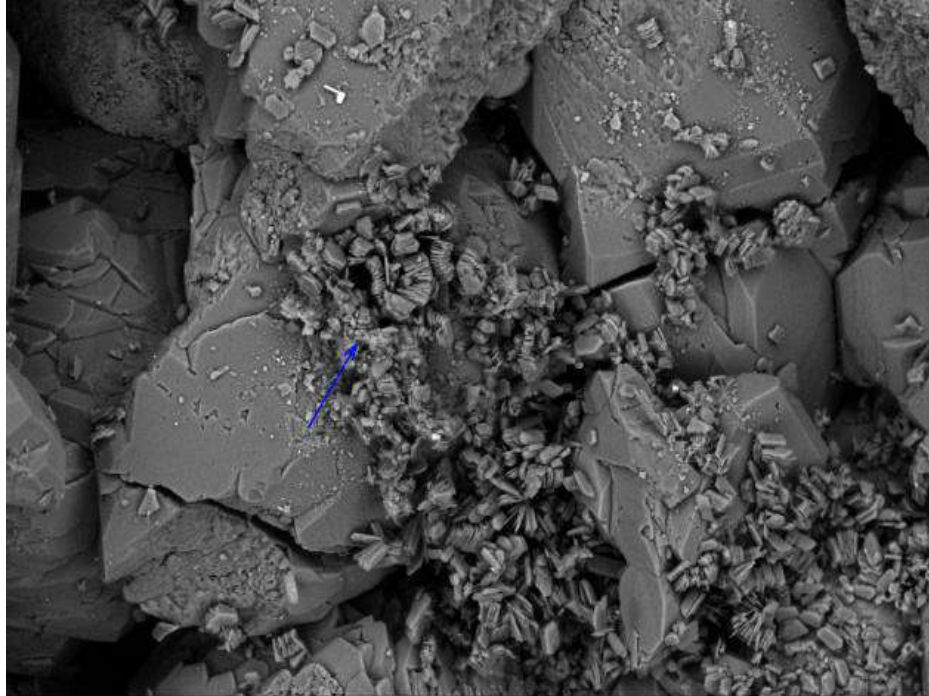


Figura 69. Detalle de la arcilla y Composición de la arcilla Prof: 7737.50'

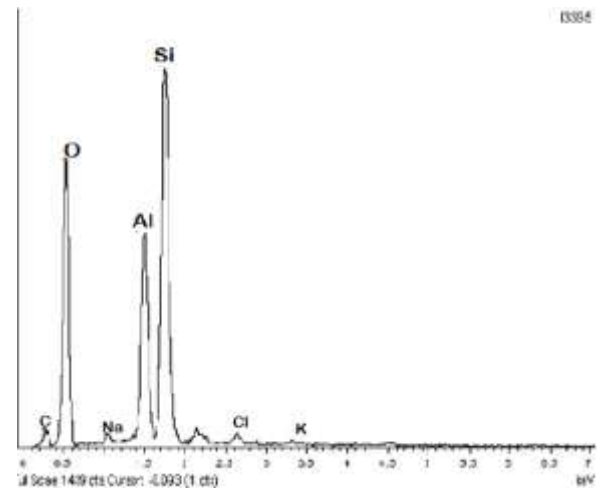
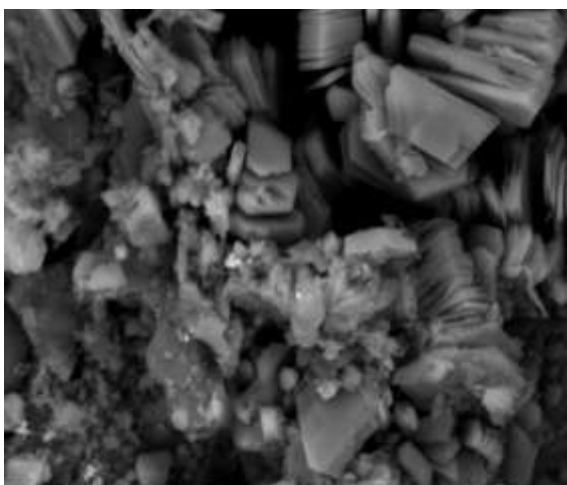


Figura 70. Mineral de fosforo y tierras raras y Composición Prof: 7737.50'

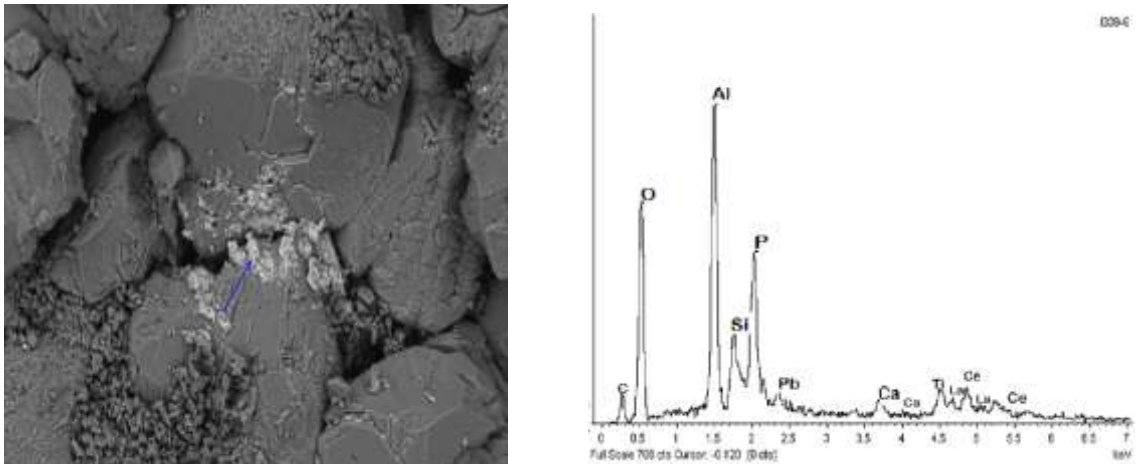
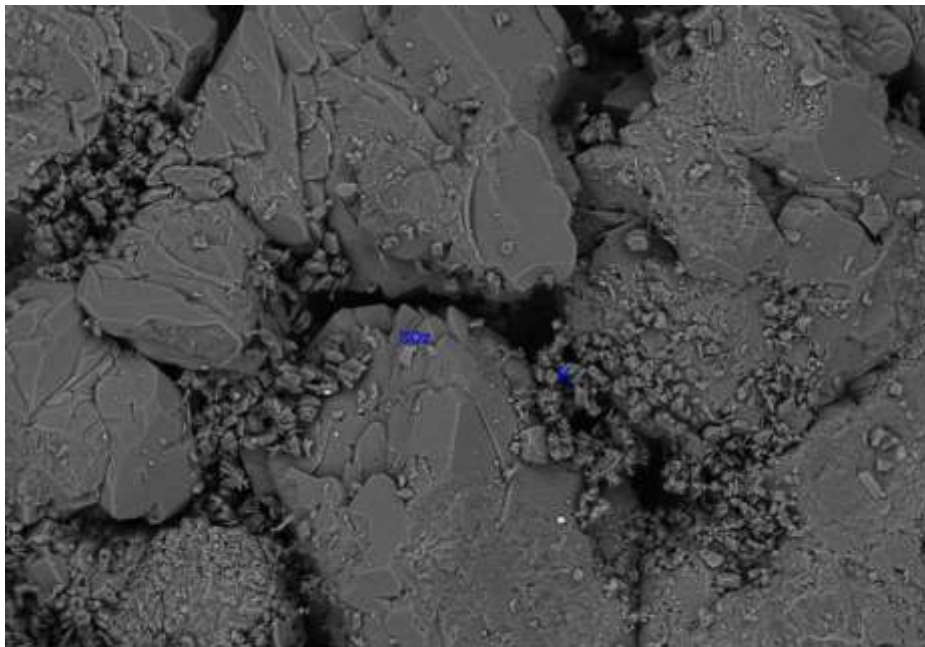


Figura 71. Caolinita a borde de grano con aspecto suelto (K) Sobrecrecimiento de cuarzo (SQz) Prof: 7737.50'



3.6.4 EVALUACIÓN DE DAÑO POR LODO

La evaluación de daño a la formación causado por el fluido de perforación de la formulación 1, de formulación 1 + 8 lb de Biomasa seca y de la formulación 2, se realizaron en los plugs Castilla Norte-A Prof.: 7716,50 ft, 7737.50ft, 7830.50 ft.

A continuación se presentan los resultados del Filtrado Dinámico y Estático y del retorno de permeabilidad obtenido para el lodo de perforación evaluado en la prueba de daño a la formación.

Tabla 23. Formulaciones para la evaluación de daño a la formación

FUNCIÓN-FAMILIA QUÍMICA	FORMULACIÓN 1	FORMULACIÓN 1 + BIOMASA	FORMULACIÓN 2
Viscosificante-Polisacárido	1.5 lpb	1.5 lpb	1.5 lpb
Reductor de filtrado-Almidón modificado	10.0 lpb	10.0 lpb	10.0 lpb
Reductor de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb	0.5 lpb	0.5 lpb
Controlador de filtrado-Carbohidrato	0.5 lpb	0.5 lpb	0.5 lpb
Estabilizador de esquistos- Poliamina etoxilada	4.0 lpb	4.0 lpb	4.0 lpb
Agente formador de puentes- Carbonato DF 5	12.0 lpb	12.0 lpb	12.0 lpb
Agente formador de puentes- Carbonato DF 25	8.0 lpb	8.0 lpb	8.0 lpb
Material de pérdida de circulación- Grafito	-	-	5.0 lpb
Biomasa		8.0 lpb	
Inhibidor de esquistos-Asfalto sulfonatado	-	-	6.0 lpb
Lubricante-Lípido	6.0 lpb	6.0 lpb	6.0 lpb
Biocida-Aldehído	0.5 lpb	0.5 lpb	0.5 lpb
Control de Ph-Hidróxido	pH 9.0	pH 9.0	pH 9.0

Fuente: Autor

3.6.4.1 PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS PLUGS UTILIZADOS

En la tabla 24, se presentan las propiedades petrofísicas básicas de los plugs del pozo Castilla Norte-A evaluado:

Tabla 24. Propiedades petrofísicas básicas de los plugs de Castilla Norte-A

INTERVALO DE PROFUNDIDAD	POROSIDAD POR INYECCION DE Hg	DENSIDAD SKELETAL	DIAMETRO MODA	SATURACION DE AIRE AJUSTADA A 2400
ft	%	g/mL	micrones	psi
7716,50	20,52	2,6572	40,8083	0,07
7737,50	20,26	2,6468	40,8370	0,03
7830,50	20,12	2,6421	52,9605	0,04

Las condiciones iniciales de la prueba para el plug de Castilla Norte-A fueron:

Presión de confinamiento: 2.500 psi

Contrapresión: 500 psi

Temperatura: 170 °F

Delta de presión del lodo contra la formación: 500 psi

Caudal del lodo: 10 cm³/min.

Caudal de la prueba: 0.5 cm³/min.

Se realizan dos circulaciones de lodo de perforación para obtener un filtrado dinámico y estático a través de los plugs, a continuación se explican cada uno de ellos.

Filtrado Dinámico: circulación del lodo de perforación a un caudal de 10 cm³/min, aplicando un Diferencial de Presión de 500 psi (Dirección de Inyección). Durante un tiempo de 1 hora manteniendo el diferencial de presión de 500 psi sobre la formación.

Filtrado Estático: Parar la Bomba, el caudal se hace cero y se determina el filtrado estático (1 hora), manteniendo el diferencial de presión de 500 psi sobre la formación.

Para la evaluación de daño a la formación se escogen dos de los fluidos de perforación que arrojaron los mejores resultados en la prueba de Filtrado PPT, según estos resultados se espera un buen taponamiento en la cara de la formación. A continuación se muestran las evaluaciones de daño debido al lodo en los plugs del pozo de Castilla Norte-A.

Tabla 25. Permeabilidades al Aceite (mD) y % de Retorno de permeabilidad

Evaluación de Daño por el Lodo	Volumen Filtrado del Lodo (cm ³)		
	Dinámico	Estático	Total
Lodo Formulación 1 + 8 lb de Biomasa en el plug Castilla Norte-A Prof: 7716.50 ft.	6.47	1.27	7.74
Lodo Formulación 2 en el plug Castilla Norte-A Prof: 7737.50 ft.	5.84	1.95	7.79
Lodo Formulación 1 en el plug Castilla Norte-A Prof: 7830.50 ft.	6.57	2.23	8.80

Tabla 26. Evaluación de Daño por el Lodo

Permeabilidades al Aceite (mD) y % de Retorno de permeabilidad				
Fluido Evaluado	PLUG	Keo antes del daño	Keo después del daño	% Ret keo después del Daño
Lodo Formulación 1 + 8 lb de Biomasa	Castilla Norte-A Prof: 7716.50 ft.	852.67 mD	613.53 mD	71.95 %
Lodo Formulación 2	Castilla Norte-A Prof: 7737.50 ft.	936.38 mD	861.79 mD	92.03 %
Lodo Formulación 1	Castilla Norte-A Prof: 7830.50 ft.	1060.66 mD	984.03 mD	92.78 %

Figura 72. Comportamiento de la Permeabilidad Lodo Formulación 1 + 8 lpb de Biomasa en el plug castilla Norte-A Prof. 7716.50 ft.

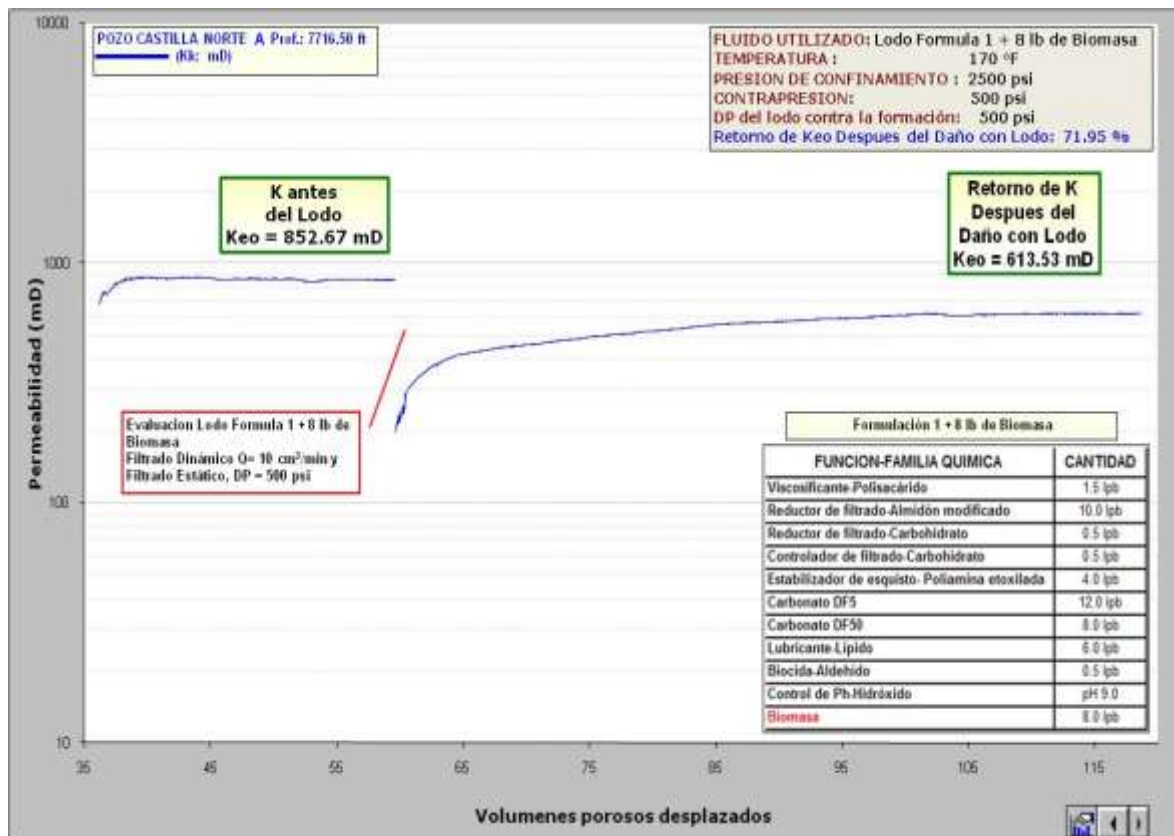


Figura 73. Comportamiento del Filtrado Dinámico y Filtrado Estático – Lodo Formulación 1 + 8 lpb de Biomasa en el plug castilla Norte-A Prof. 7716.50 ft.

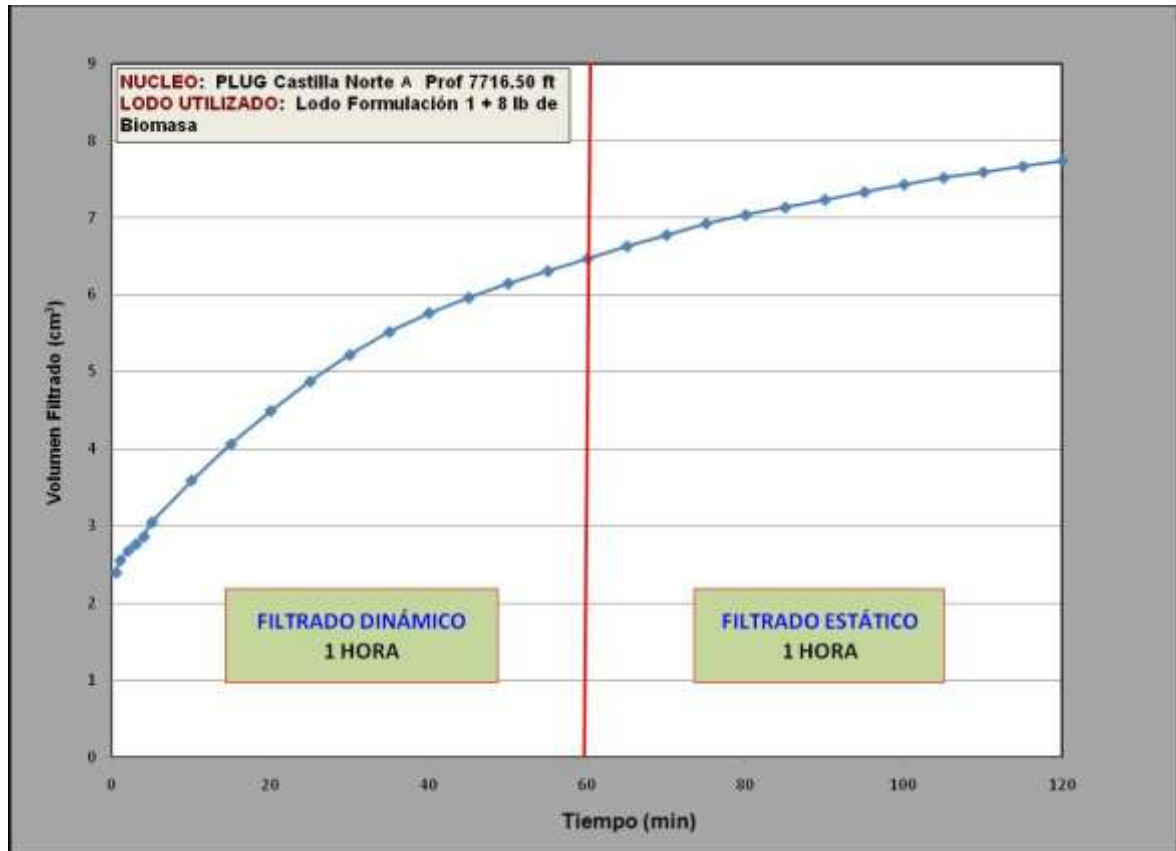


Figura 74. Comportamiento de la Permeabilidad Lodo Formulación 2 en el plug castilla Norte-A Prof. 7737.50 ft

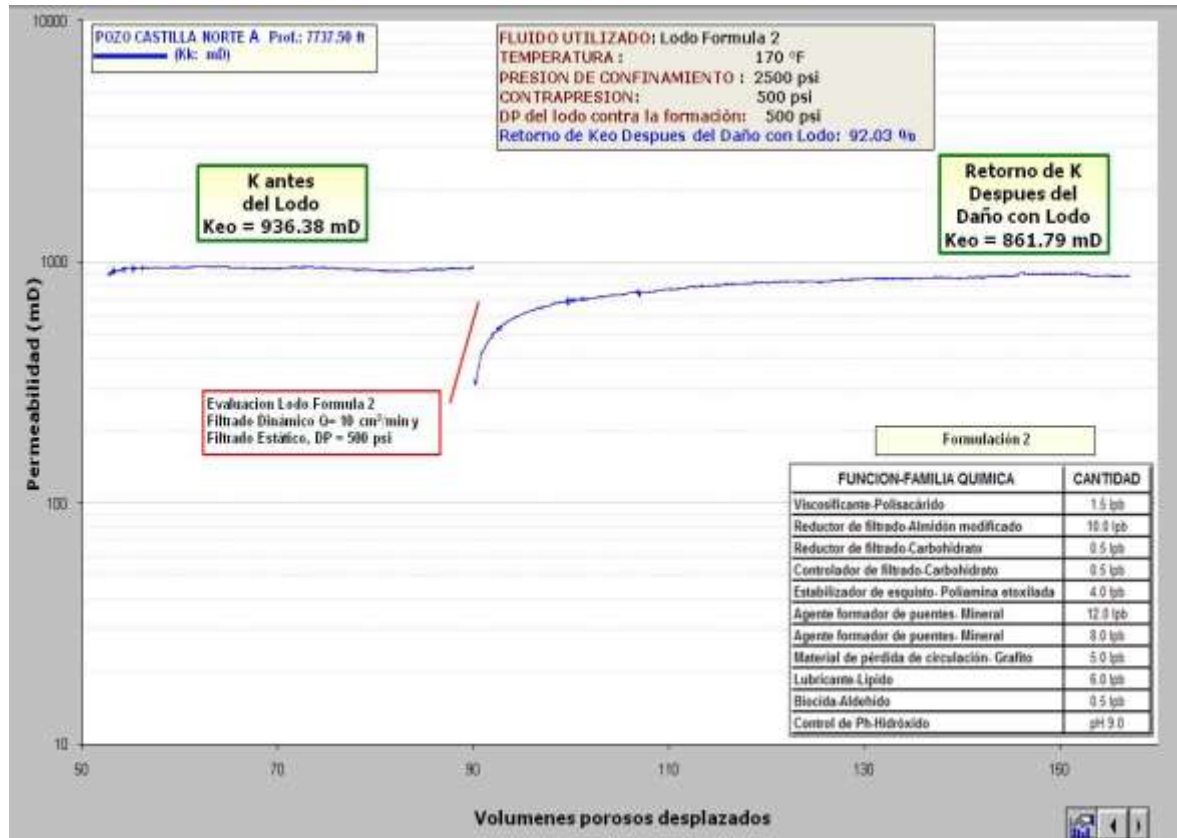


Figura 75. Comportamiento del Filtrado Dinámico y Filtrado Estático- Lodo Formulación 2 en el plug castilla Norte-A Prof. 7737.50 ft.

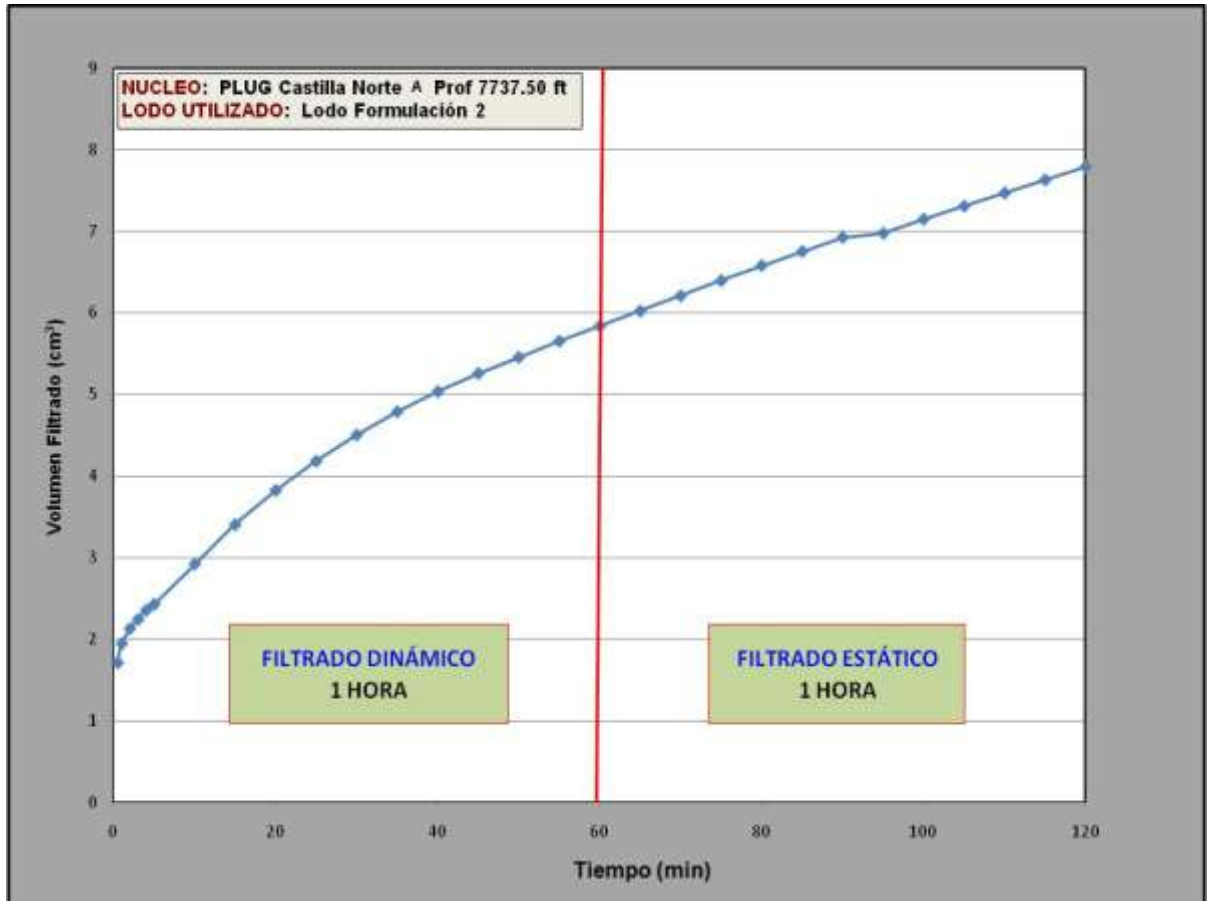


Figura 76. Comportamiento de la Permeabilidad Lodo Formulación 1 en el plug castilla Norte-A prof.: 7830.50 ft.

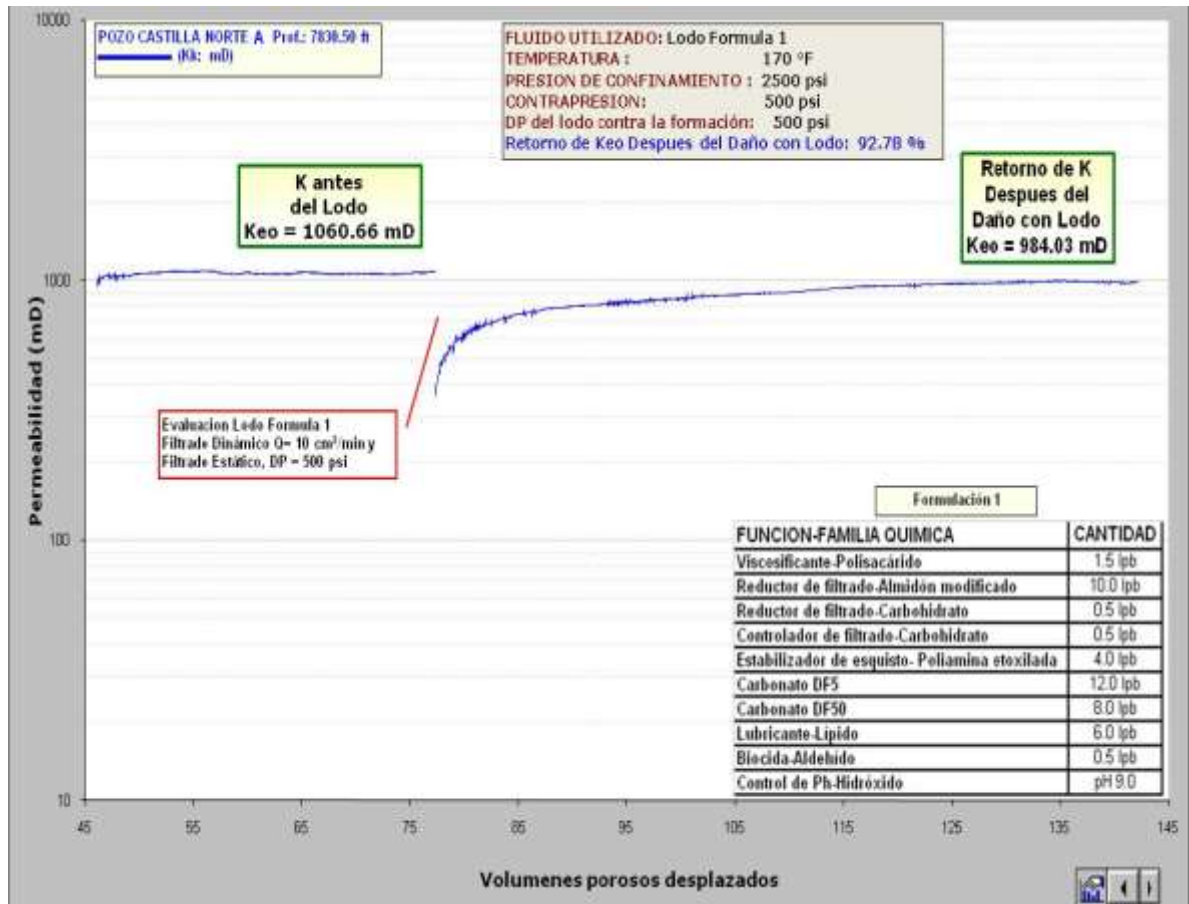
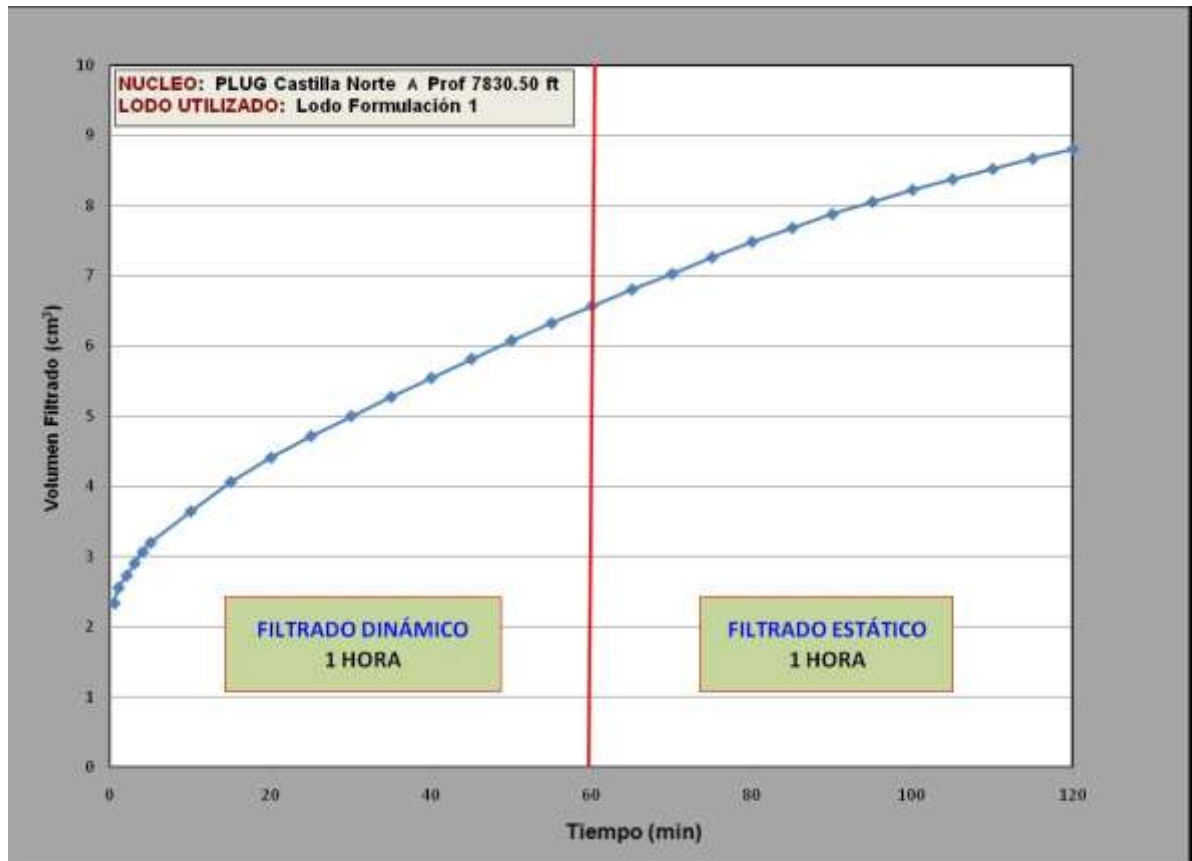


Figura 77. Comportamiento del Filtrado Dinámico y Filtrado Estático – Lodo Formulación 1 en el plug castilla Norte-A Prof.: 7737.50 ft.



3.6.5 ANÁLISIS SEM DESPUÉS DEL DAÑO A LA FORMACIÓN

3.6.5.1 CASTILLA NORTE-42 PROFUNDIDAD: 7716.50'

Con el fin de evaluar la invasión del lodo, se tomo una muestra del corazón Castilla Norte-A Profundidad: 7716.50'. Para la identificación de los posibles cambios en la roca por su interacción con los fluidos durante las pruebas de desplazamiento, se analiza con un reconocimiento previo de entre los aditivos del lodo se encuentra: el grafito quien está constituido únicamente por carbono.

La distribución de minerales, sus características morfológicas y composición química elemental y la evaluación del sistema poroso, sobre muestras de corazón limpio, con el fin de conocer su estado inicial y usar esta información como parámetro comparativo en el análisis posterior una vez se haya realizado el desplazamiento.

Con el fin de evaluar el daño por filtrado de lodo, se tomó un plug al cual se le desplazaron los siguientes fluidos:

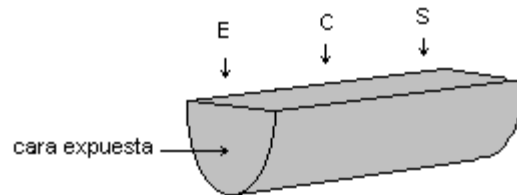
- a. Desplazamiento de aceite Kaidol, salmuera castilla norte- K aceite Kaidol
- b. Desplazamiento del lodo sobre la cara de producción y realización de filtrado a través del plug.
- c. Desplazamiento de aceite kaidol, y se desplaza salmuera castilla norte A para dejar el plug en salmuera.

Entre la formulación del lodo están presentes: Carbonatos y Golden ChlorellaTMOmega, es decir, Carbonato de Calcio y Biomasa respectivamente.

El corazón o plug utilizado en las pruebas de desplazamiento se fracturó a la mitad, exponiendo una sección longitudinal, transversal a la cara de entrada de flujo (figura 79). Sobre esta sección se evaluaron los cambios en el sistema poroso

y en la distribución de minerales tomando muestra a la entrada (E), media (C) y salida (S) del corazón y en la cara expuesta a los fluidos desplazados.

Figura 78. Descripción del procedimiento SEM después del daño



Uno de los aditivos del lodo es un compuesto de Golden ChlorellaTM Omega (Biomasa), este está constituido principalmente de Carbono, oxígeno y potasio (Figura 80 y Figura 81).

Figura 79. Aspecto general de la Golden ChlorellaTMOmega Prof: 7716.50'

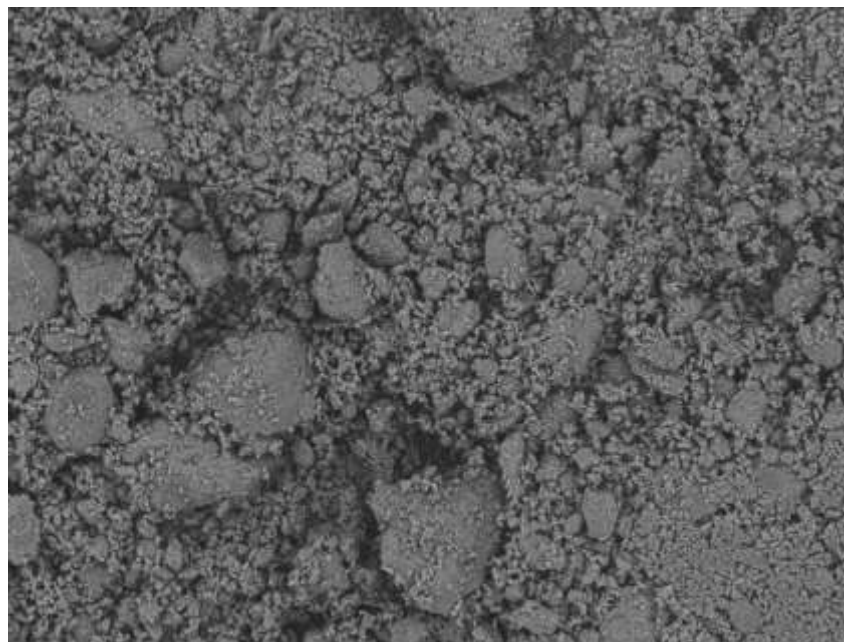
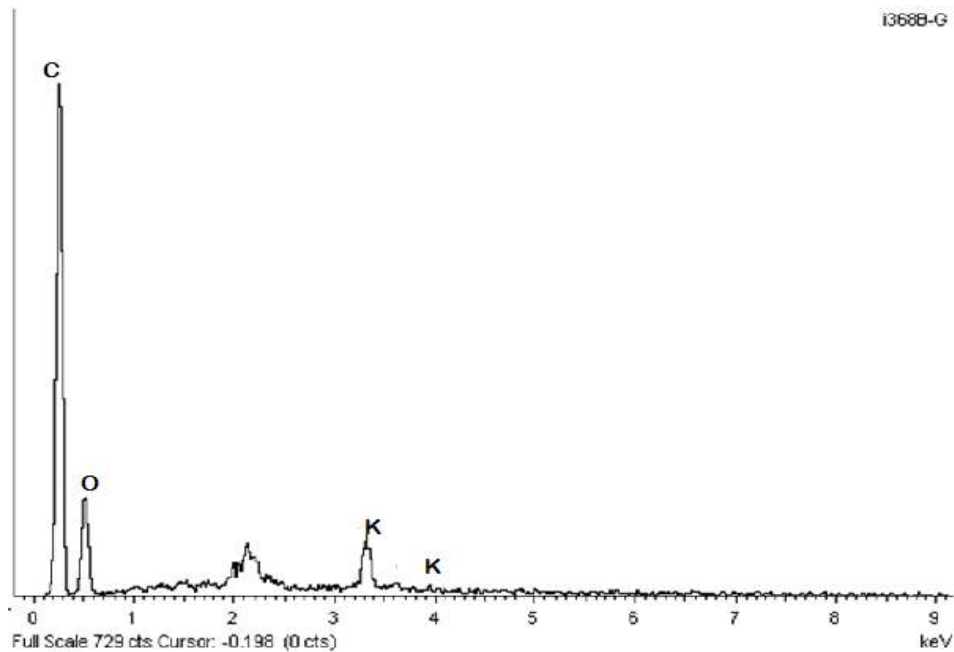


Figura 80. Espectro de la Golden ChlorellaTMOmega Prof: 7716.50'



• CARA DE INYECCIÓN

En la cara de inyección del plug, se observa que este presenta escasos poros despejados, la muestra está constituida principalmente por Carbono, oxígeno, aluminio y silicio, esta composición no discrepa mucho de la muestra sin limpieza en sus componentes principales pero si en la cantidad de carbono detectado; tal como se aprecia en la muestra esta se encuentra impregnada en su totalidad por abundante material orgánico (Figura 81), en donde se hace presente además de los elementos que constituyen la muestra el potasio, componente que forma parte de la biomasa, y que se encuentra relleno el sistema poroso de manera total y parcial en conjunto con material particulado y arcillas, los cuales a su vez se encuentran sobre granos y de manera dispersa.

Figura 81. Detalle de material que impregna la muestra Prof: 7716.50'

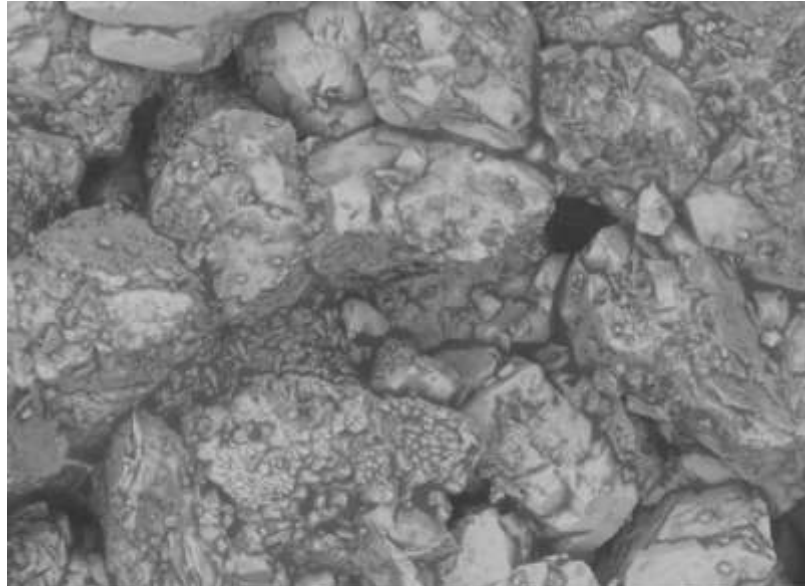
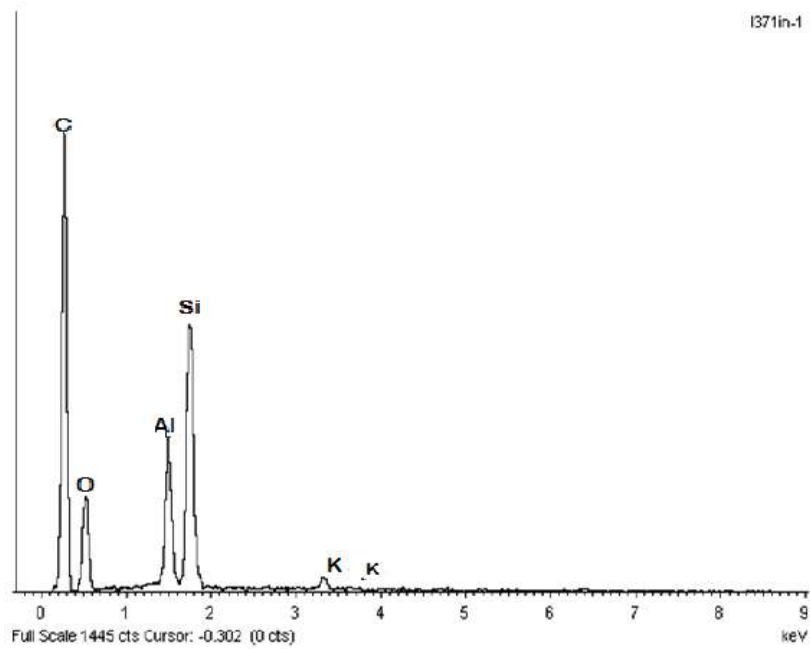


Figura 82. Composición de zonas oscuras de la muestra Prof: 7716.50'



- **ZONA DE ENTRADA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO**

Uno de los aditivos del lodo es un compuesto de Golden Chlorella™ Omega (Biomasa), este está constituido principalmente de Carbono, oxígeno y potasio. A continuación se presentan las figuras más representativas del estudio realizado.

Figura 83. Aspecto y Composición general Prof: 7716.50'

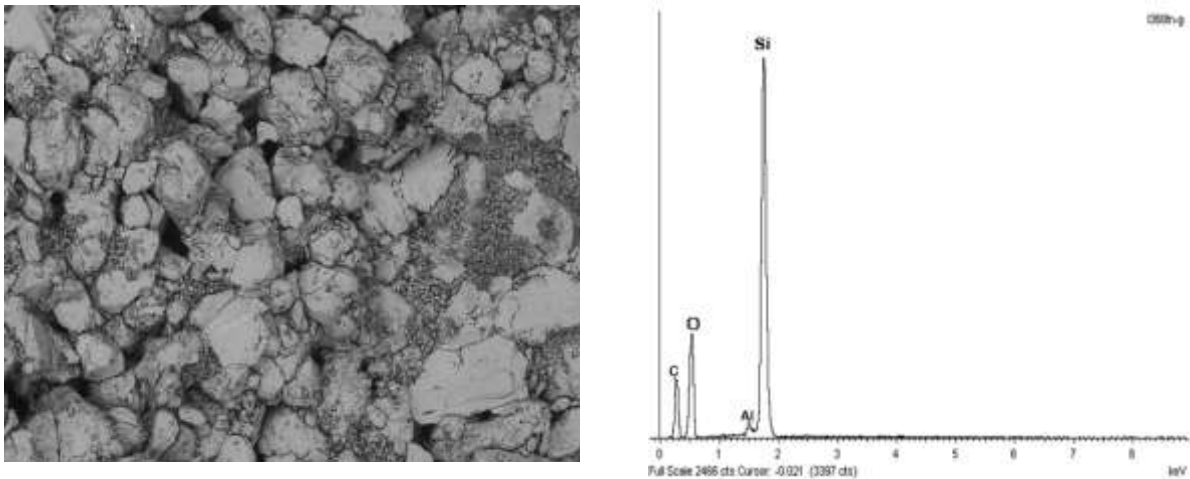


Figura 84. Caolinita en espacio poroso Prof: 7716.50'

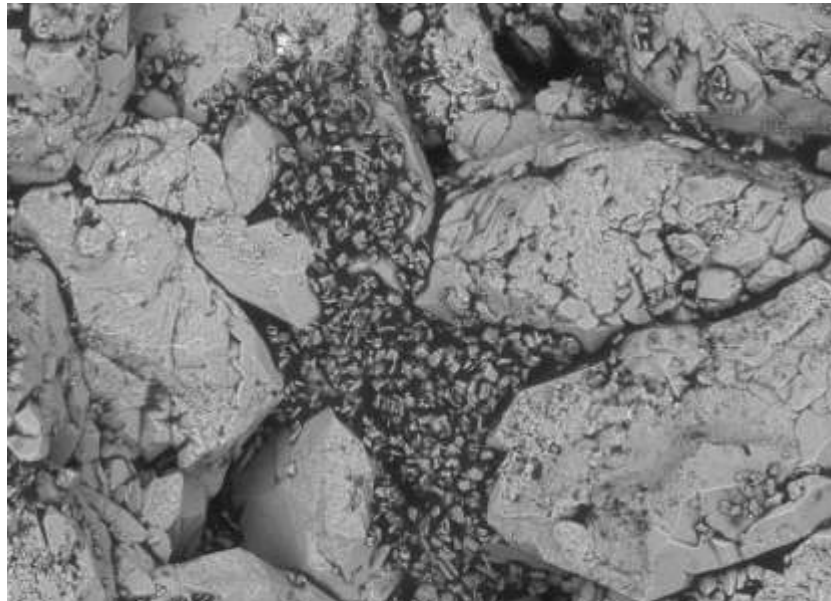


Figura 85. Ampliación de la Figura 84 Prof: 7716.50'

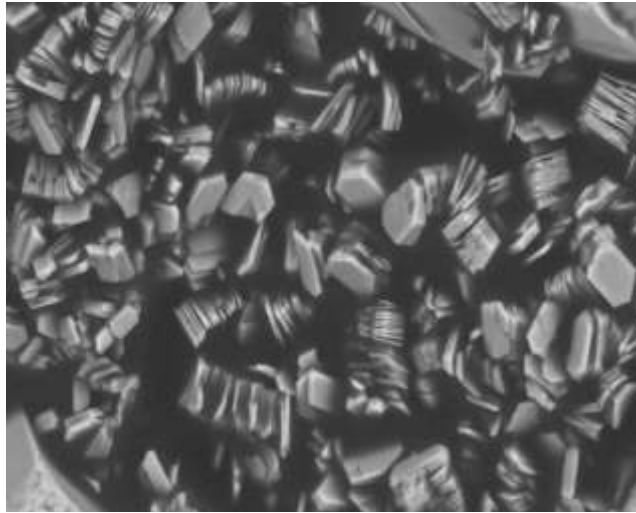
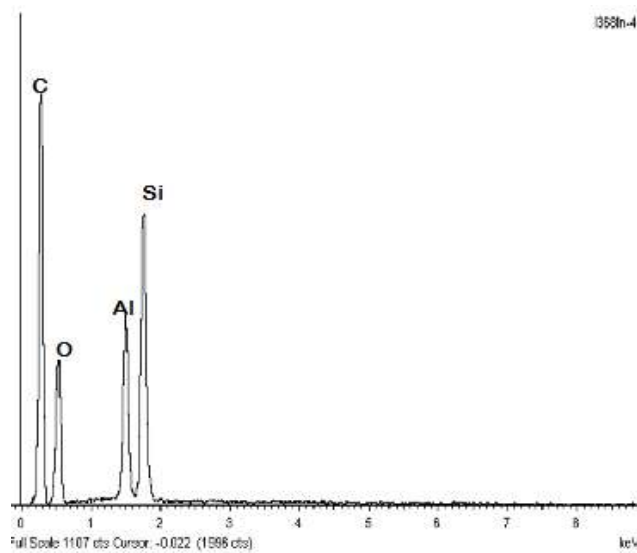


Figura 86. Composición Caolinita Prof: 7716.50'



- **ZONA MEDIA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO**

Se observa algunos poros despejados, con presencia de minerales y material arcilloso tipo caolinita dispersa como relleno de poro. Presenta impregnaciones con material que presenta alto contenido orgánico, calcio y potasio, los cuales pueden corresponder a residuo del lodo inyectado.

Figura 87. Material orgánico sobre y entre grano Prof: 7716.50'

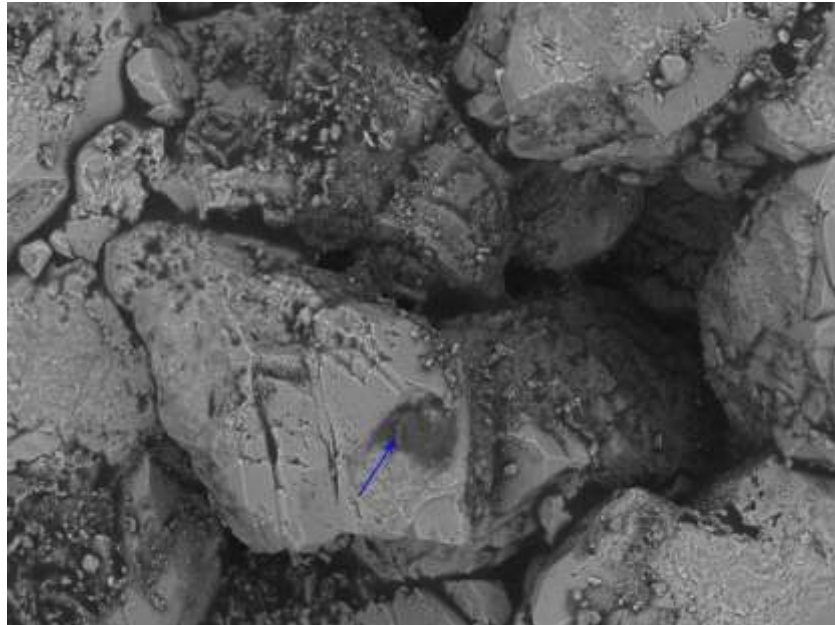
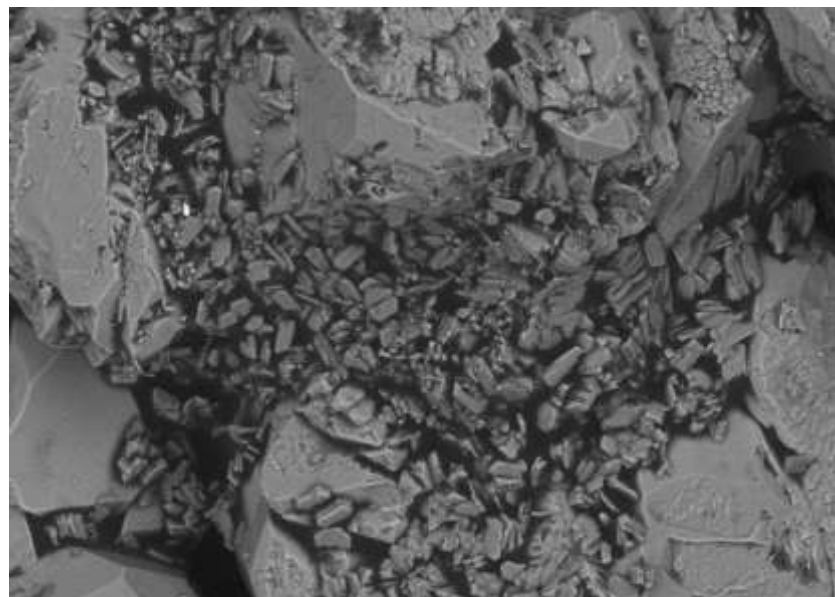


Figura 88. Caolinita entre poro Prof: 7716.50'



- **ZONA DE SALIDA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO**

Al interior del plug en la parte de salida de los fluidos el sistema poroso se observa con algunos poros despejados. Presenta arcillas tipo caolinita como relleno de poro impregnado por el fluido usado en el tratamiento. En la zona de salida de tratamiento (distancia entre el borde de la salida y la zona de análisis 776m) se observa la presencia de material orgánico con un bajo contenido de calcio.

Figura 89. Material orgánico entre granos Prof: 7716.50'

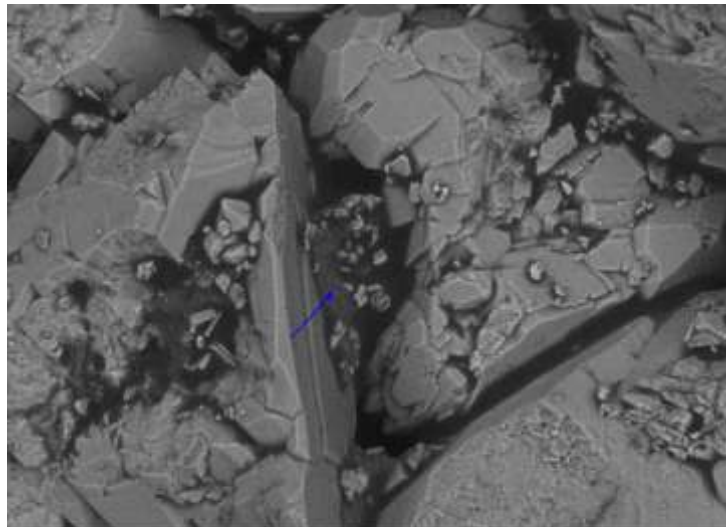
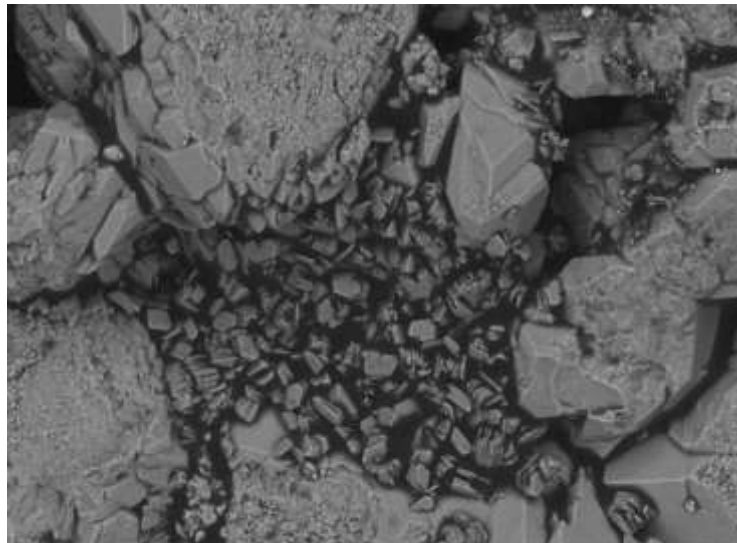


Figura 90. Caolinita entre poro Prof: 7716.50'



3.6.5.2 CASTILLA NORTE-42 PROFUNDIDAD: 7737.50'

Entre los aditivos del lodo se encuentra: grafito quien está constituido únicamente por carbono.

Figura 91. Aspecto general del grafito Prof: 7737.50'

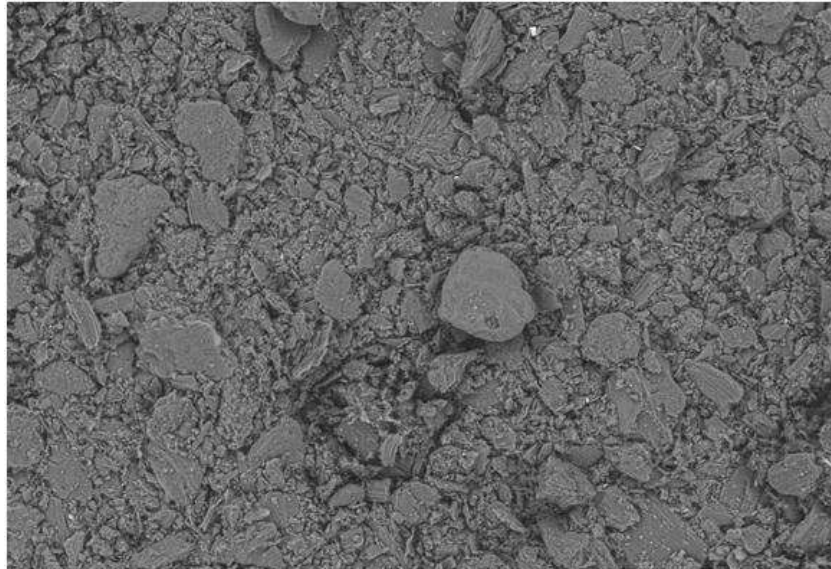
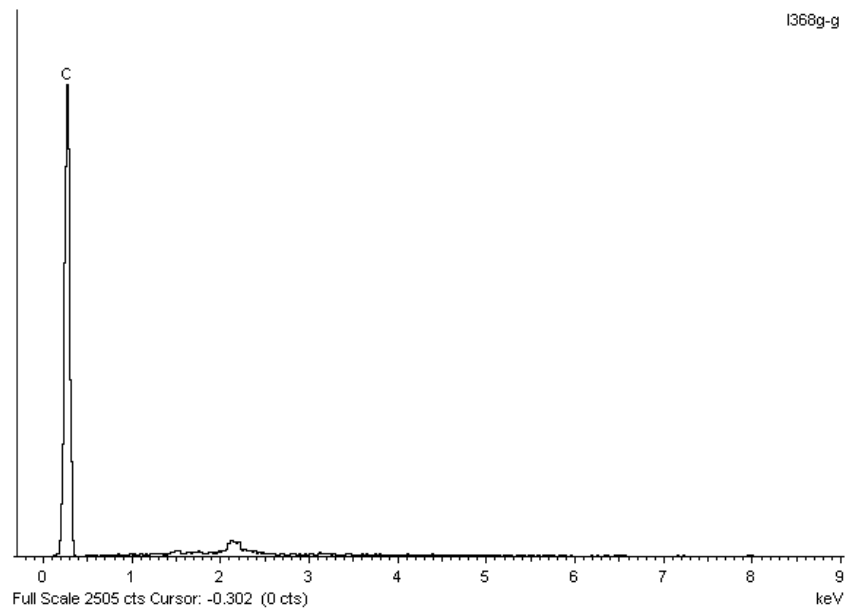


Figura 92. Composición general del grafito Prof: 7737.50'



- **ZONA DE ENTRADA**

Al interior del plug en la parte de entrada de los fluidos el sistema poroso se observa con algunos poros despejados. . Presenta arcilla tipo caolinita dispersa y como relleno de poro mezclada con un material de alto contenido orgánico, este orgánico a su vez se encuentra distribuido en toda la muestra mezclado con la arcilla, sobre, entre y a borde de grano. En la zona de entrada de tratamiento (distancia entre el borde de la entrada y la zona de análisis 3.8mm aproximadamente) se observa la presencia de material orgánico con elementos como aluminio y silicio, propios de la muestra, calcio, potasio y azufre, estos últimos pueden corresponder al residuo del tratamiento inyectado, este material se observa durante el análisis a la zona de entrada a diferentes distancias del borde de inyección de la muestra. Se encontró material con alto contenido de carbono y presencia de aluminio, silicio, potasio a 1mm del borde.

Figura 93. Aspecto y Composición general Prof: 7737.50'

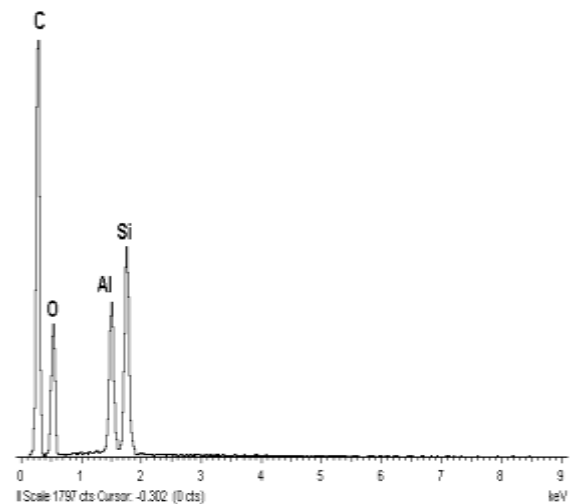
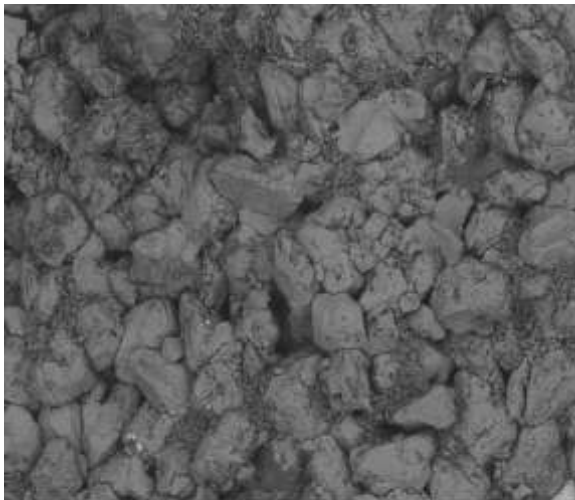


Figura 94. Material relleno poro Prof: 7737.50'

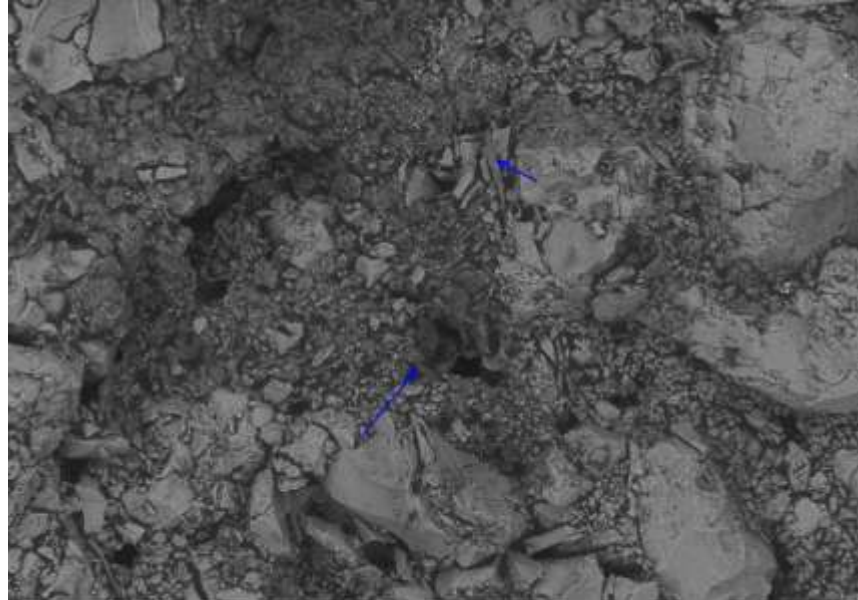
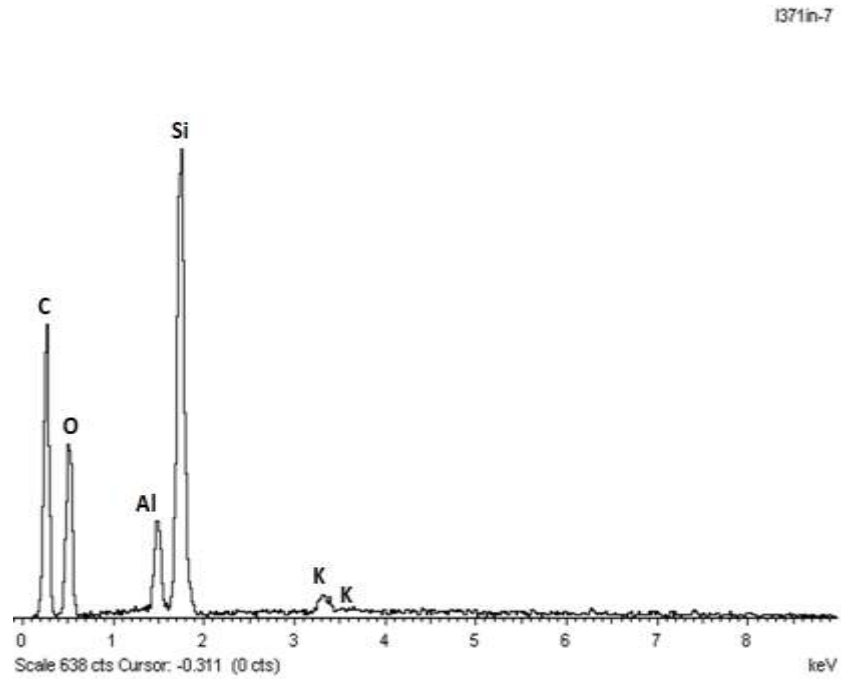


Figura 95. Composición de la Figura 94 Prof: 7737.50'



- **ZONA MEDIA**

Se observa algunos poros despejados, con presencia de minerales y material arcilloso tipo caolinita dispersa y como relleno de poro. Presenta impregnaciones con material que presenta alto contenido orgánico, los cuales pueden corresponder a residuo del tratamiento inyectado.

Figura 96. Aspecto general Prof: 7737.50'

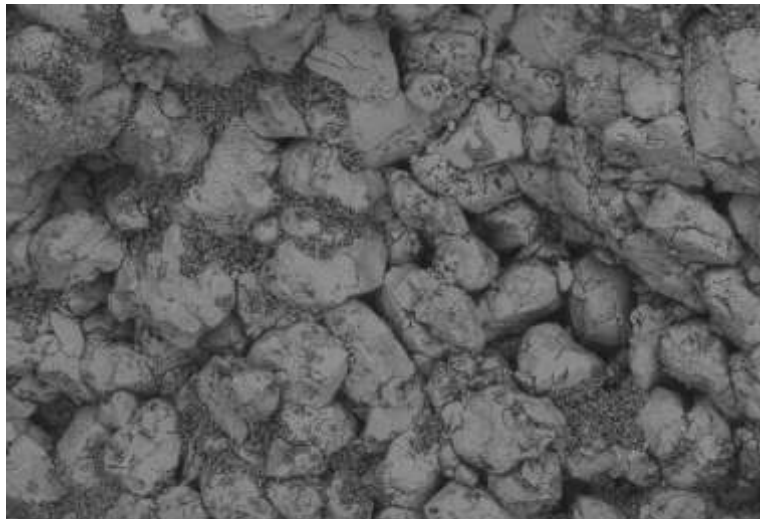


Figura 97. Composición general Prof: 7737.50'

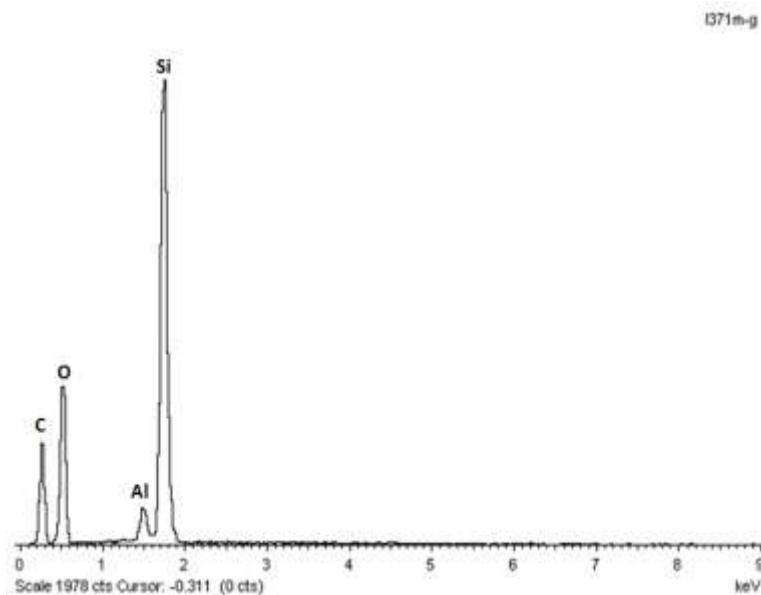


Figura 98. Material sobre grano Prof: 7737.50'

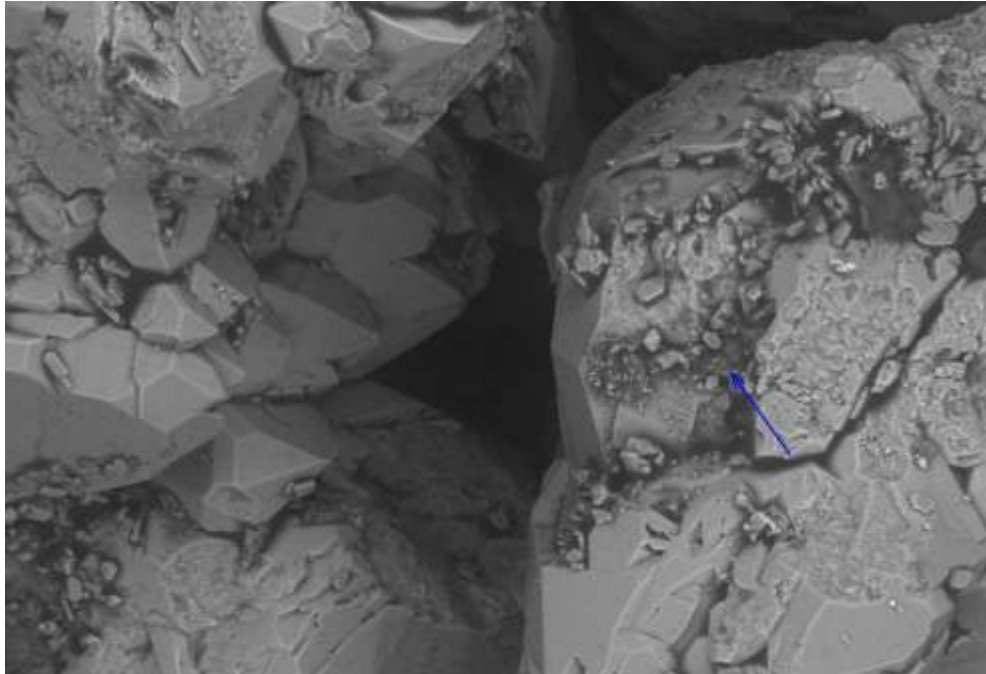
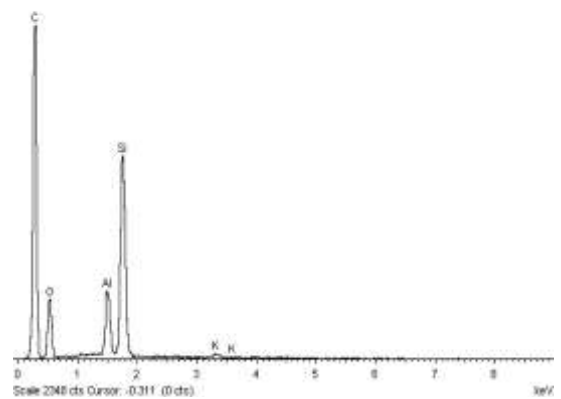
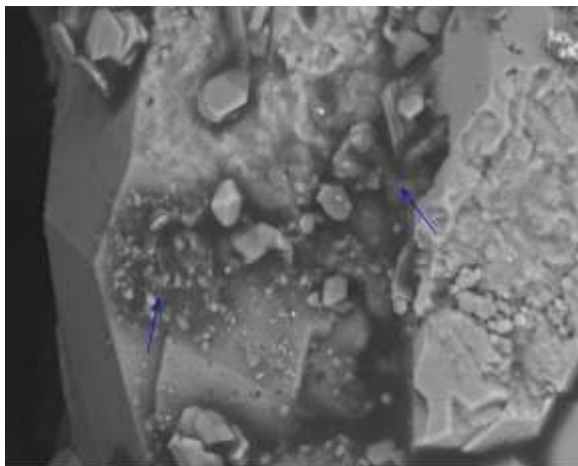


Figura 99. Detalle y Composición del material sobre grano Prof: 7737.50'



- **ZONA DE SALIDA**

Al interior del plug en la parte de salida de los fluidos el sistema poroso se observa con algunos poros despejados. Presenta arcillas tipo caolinita como relleno de poro impregnado por el fluido usado en el tratamiento. En la zona de salida del plug (distancia entre el borde de la salida y la zona de análisis 1.2mm) se observa la presencia de material orgánico con un bajo contenido de calcio y potasio.

Figura 100. Aspecto general Prof: 7737.50'

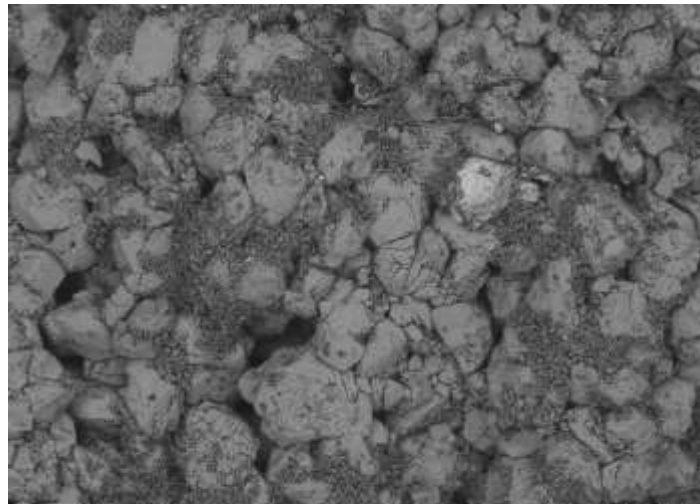


Figura 101. Composición del material Figura 100 Prof: 7737.50'

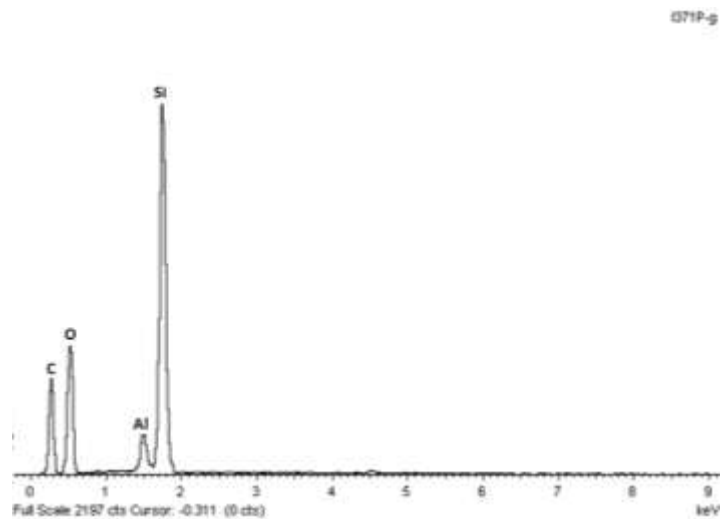


Figura 102. Material a borde de grano Prof: 7737.50'

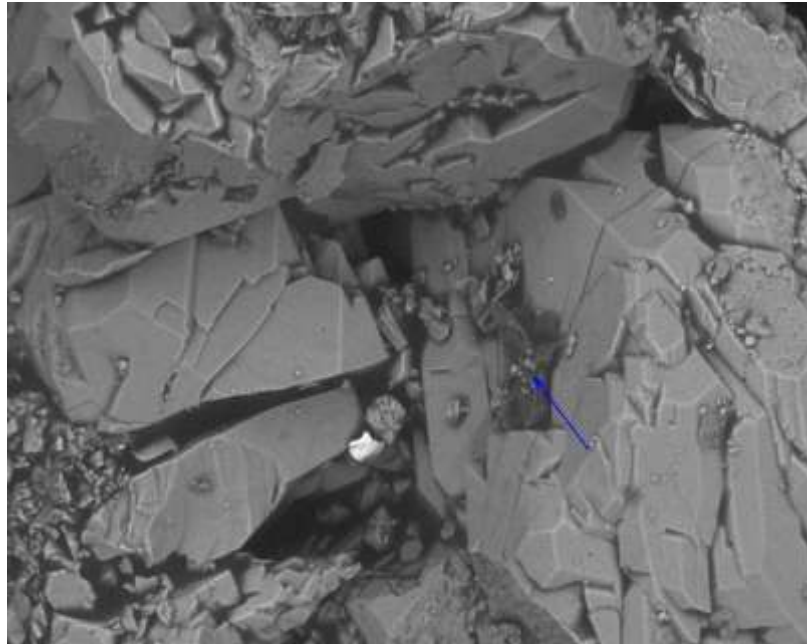
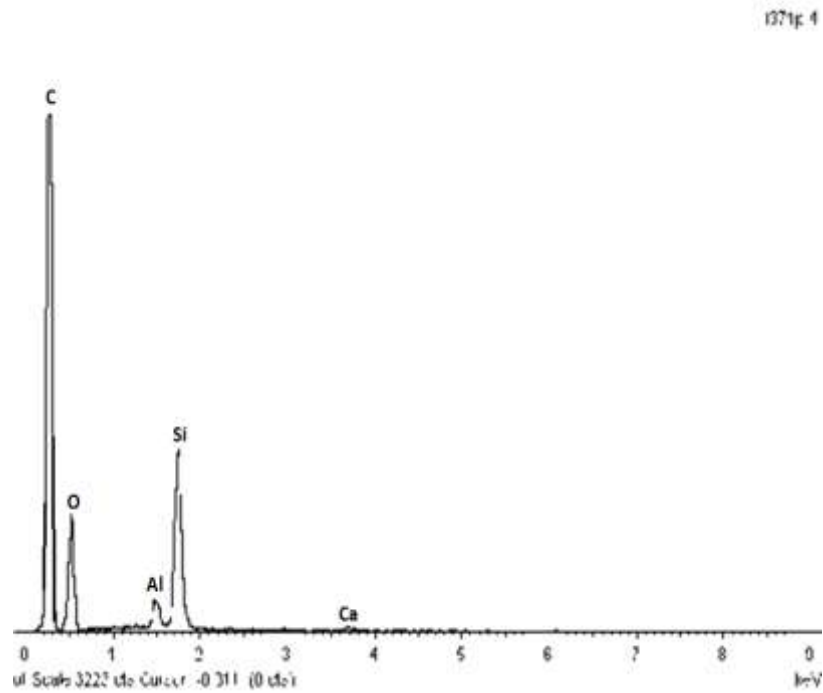


Figura 103. Composición del material Figura 102 Prof: 7737.50'



CONCLUSIONES

La biomasa evaluada (muy fina) no sirve como material puenteante ya que genera un daño en la formación que supera el 20%.

Los valores altos reportados en el análisis reológico se debe a la adición de la Biomasa de algas en las formulaciones 1, 2 y 3, ya que es un material que se disuelve en el fluido de perforación incrementado la viscosidad plástica y yield point. Las formulaciones 2 y 3 demuestran en los resultados arrojados que son muy similares.

La biodegradabilidad de la biomasa es un factor positivo ya que al penetrar en la formación puede depositarse dentro de los poros y degradarse con facilidad y salir del poro con el tiempo, restaurando el daño.

Se observa que a medida que se adiciona la Biomasa, la capacidad de intercambio catiónico en la prueba de azul de metileno es la misma con y sin la adición de Biomasa en el fluido de perforación.

La adición de biomasa al fluido no incrementa la cantidad de sólidos y líquidos lo que confirma la dilución del material en el fluido de perforación.

La biomasa evaluada presenta un tamaño de partícula muy fino haciendo que penetre en los poros de la formación invadiendo el núcleo en su totalidad, causando un daño superior al 20%.

El grafito arrojó mejores resultados en toda la investigación comparado con la Biomasa de algas.

RECOMENDACIONES

Continuar con la evaluación de tamaños de grano de biomasa de algas teniendo en cuenta el tamaño de garganta de la formación a evaluar como material puenteante a fin de obtener un taponamiento óptimo sin que haya invasión en la zona productora.

Realizar una investigación para la remoción de la biomasa seca de algas en el plug sería un factor positivo, ya que el material biodegradable al penetrar en la formación puede depositarse dentro de los poros y degradarse con facilidad y salir del poro con el tiempo, restaurando el daño.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ajay Suri, Mukul M. Sharma, University of Texas at Austin: Strategies for Sizing Particles in Drilling and Completion Fluids, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 68964-MS, 2001.
2. American Petroleum Institute , apéndices J, Taponamiento de fluidos de perforación y completamiento API RP 13B-1, 2009.
3. American Petroleum Institute Contenido de sólidos y líquidos en lodos, Viscosidad Plástica, punto de cedencia y fuerza de gel, Pérdida de filtrado baja presión baja temperatura, Azul de metileno para lodos. API RP 13B-1 2009.
4. Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; Walters, K.: An Introduction to Rheology. Elsevier, Amsterdam, 1989.
5. Brownson, G.W., Peden, J.M., Heriot-Watt U, A systematic approach to assessing permeability impairment due to drilling fluids, Society of Petroleum Engineers, SPE 9727-MS 1980.
6. C. Cameron, Halliburton Energy Services, Drilling Fluids Design and Management for Extended Reach Drilling, IADC/SPE Drilling Conference, SPE 72290-MS, 2001.
7. C.D. Ivan, M-I L.L.C.; J.L. Quintana, Occidental of Elk Hills Inc.; L.D. Blake, M-I L.L.C., Aphron-Base Drilling Fluid: Evolving Technologies for Lost Circulation Control, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 71377-MS, 2001.
8. Chesser, B.G., Clark, D.E., Wise, W.V., Milpark Drilling Fluids: Dynamic and Static Filtrate-Loss Techniques for Monitoring Filter-Cake Quality Improves Drilling-Fluid Performance, Society of Petroleum Engineers SPE 20439-PA, 1994.
9. D.G. Longeron, Institut Français du Pétrole; J. Alfenore, Elf Exploration-Production; N. Salehi, Cenergys; S.Saintpère, TOTALFINA: Experimental Approach to Characterize Drilling Mud Invasion, Formation Damage and Cleanup Efficiency in Horizontal Wells with Openhole Completions, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 58737-MS, 2000.
10. Donovan, Joseph P., Jones, Tom A., Baker Hughes INTEQ: Specific Selection Criteria and Testing Protocol Optimize Reservoir Drill-in Fluid Design, Society of Petroleum Engineers, Inc. SPE 30104-MS, 1995.
11. Edween R. Chirinos Vargas, PDVSA. Taponés Perforables Para El Control De Perdidas De Circulación Durante La Perforación En Lagomar.
12. Fraser, L.J., Schlumberger Dowell; Reid, P., Schlumberger Cambridge Research; Williamson, D., Enriquez, Jr., F., Schlumberger Dowell, Mechanistic Investigation of the Formation Damaging Characteristics of Mixed Metal Hydroxide Drill-In Fluids and

Comparison With Polymer-Base Fluids, Society of Petroleum Engineers, Inc. SPE 30501-MS 1995.

13. Hale, Arthur H., Lau, Hon Chung, Bernardi, Louis A., Albrecht, Michele S., Faircloth, Robert J., Morgenthaler, Lee N., Kieley, Jim M., Shell E&P Technology Co. Selection and Qualification of Drill-In Fluids for Horizontal Wells in Unconsolidated Sands, Society of Petroleum Engineers, Inc. SPE 37077-MS, 1996.
14. H.K.J. Ladva, M.E. Brady, P. Sehgal, S. Kelkar, Schlumberger; P. Cerasi, SINTEF; G. Daccord, Schlumberger; W.E. Foxenberg, M-I; C. Price-Smith, P. Howard, M. Parlar, Schlumberger: Use of Oil-Based Reservoir Drilling Fluids in Open-Hole Horizontal Gravel-Packed Completions: Damage Mechanisms and How to Avoid Them, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 68959-MS, 2001.
15. Howell, J.N., Tenneco Oil Co.: Pore Pressures Control Drilling Economics, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. SPE 1704-MS, 1967.
16. J.F. Argillier, Annie Audibert, Daniel Longeron, Inst. Français du Pétrole, Performance Evaluation and Formation Damage Potential of New Water-Based Drilling Formulas, Society of Petroleum Engineers, SPE 59484-PA, 1999.
17. L.J. Fraser, Dowell; P.I. Reid, Schlumberger Cambridge Research; L.D. Williamson, F.P. Enriquez, Jr., Dowell: Formation-Damaging Characteristics of Mixed Metal Hydroxide Drill-In Fluids and a Comparison With Polymer-Base Fluids, Society of Petroleum Engineers, SPE 57714-PA, 1999.
18. Longeron, D.G., Institut Français du Pétrole; Alfenore, J., Elf Exploration Production; Poux-Guillaume, G., Total Exploration Production, Drilling Fluids Filtration and Permeability Impairment: Performance Evaluation of Various Mud Formulations Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 48988-MS, 1998.
19. Louise Bailey, E. S. Boek, Schlumberger Cambridge Research; S. D. M. Jacques, Birkbeck College; Tony Boassen, O. M. Selle, Statoil; J. F. Argillier, D. G. Longeron, Inst. Français du Pétrole, Particulate Invasion From Drilling Fluids, Society of Petroleum Engineers, SPE 67853-PA, 2000.
20. Lozano Viera, Rivas Diego, Loza Jaime, Suárez Diego, Calderón Zuly. “Factibilidad Técnica De La Perforación Bajo-Balance Para Un Campo En La Cuenca De Los Llanos Orientales” 2000.
21. M. Parlar, Schlumberger Dowell; S.A. Ali, Chevron U.S.A.; C. Price-Smith, P. Palthe, F.F. Chang, Schlumberger Dowell; H. Ladva, Schlumberger Cambridge Research; D. Patel, Schlumberger Perforating and Testing Guidelines for Selection of Fluid Loss Control

- Methods Before and After Sand Control Treatments to Maximize Well Productivity and Cost-Effectiveness, Society of Petroleum Engineers, Inc. 1998.
22. Marshall S. David, Baker Hughes INTEQ; Haywood David, Ranger Oil (U.K.) Limited, Anglia In-Fill Drilling Campaign: Drill-In Fluid Design and Application SPE 59193-MS, 2000.
 23. Queiroz João, Petrobras, Optimizing Drill in Fluid Composition on Filter Cake Lift-off Pressure for Openhole Completion Offshore Applications, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 73713-MS, 2002.
 24. Rana S. Roy, Mukul M. Sharma, University of Texas at Austin: The Relative Importance of Solids and Filtrate Invasion on the Flow Initiation Pressure, Society of Petroleum Engineers Inc. SPE 68949-MS, 2001.
 25. R.C. Navarrete, Kelco Oil Field Group of Pharmacia Corporation; H.L. Dearing, OGS Laboratory; V.G. Constien, Constien & Assoc.; K.M. Marsaglia, Westport Technology Center International; J.M. Seheult, P.E. Rodgers, Kelco Oil Field Group of Pharmacia Corporation, Experiments in Fluid Loss and Formation Damage with Xanthan-Based Fluids While Drilling, , IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, SPE 62732-MS, 2000 .
 26. R.D. Cargnel, J. P. Luzardo, SPE, M-I Drilling Fluids de Venezuela. Particle Size Distribution Selection of CaCO₃ in Drill-In Fluids: Theory and Applications, SPE 53937.
 27. R.F.T. Lomba, A.L. Martins, C.M. Soares, E.M. Brandao, J.V.M. Magalhaes, M.V.D. Ferreira, PETROBRAS, Drill-In Fluids: Identifying Invasion Mechanisms, SPE 73714-MS, 2002.
 28. S. Alford, A. Dzialowski, P. Jiang, H. Ullmann, M-I, Research Into Lubricity, Formation Damage Promises to Expand Applications for Silicate Drilling Fluids, SPE/IADC Drilling Conference, SPE 67737-MS, 2001.
 29. Santos Helio, Impact Engineering Solutions; Jesus Olaya, Ecopetrol/ICP, No-Damage Drilling: How to Achieve this Challenging Goal? IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, SPE 77189-MS, 2002.
 30. Shiyong Luo, Yingfeng Meng and Hongmin Tang, Southwest Petroleum Institute, Yongxin Zhou, Tuha Oil & Gas Exploration Bureau: A New Drill-In Fluid Used for Successful Underbalanced Drilling, China, Society of Petroleum Engineers, SPE 58800-MS, 2000.
 31. Zulkeffeli M. Zain, PETRONAS Research, and Mukul M. Sharma, Society of Petroleum Engineers(SPE), University of Texas at Austin, Cleanup of Wall-Building Filter Cakes, Cleanup of Wall-Building Filter Cakes, SPE 56635-MS, 1999.