

**FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO ADITIVO EN  
LODOS DE PERFORACIÓN**

**ANDRÉS FERNANDO BAUTISTA CUADROS  
ELKIN DARÍO FLÓREZ BARRETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

**FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO ADITIVO EN  
LADOS DE PERFORACIÓN**

**ANDRÉS FERNANDO BAUTISTA CUADROS  
ELKIN DARÍO FLÓREZ BARRETO**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero de Petróleos**

**DIRECTOR:**

**M.Sc. EMILIANO ARIZA LEÓN  
Ingeniero de Petróleos**

**CO-DIRECTOR:**

**Ph.D. DANIEL RICARDO MOLINA VELASCO  
Química Pura**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **DEDICATORIA**

*Gracias a DIOS por haberme permitido realizar este sueño, y a toda mi familia, quienes confiaron en mí y me apoyaron.*

*Quiero agradecer de manera muy especial a mi madre MARTHA JANETH BARRETO PEDRAZA, a mi padre MARCO AURELIO FLÓREZ FLÓREZ y a mis hermanos SERGIO ALONSO y LAURA MARCELA, que confiaron en mí y me dieron su apoyo incondicional.*

*Igualmente quiero darle gracias a mi novia JENNY YURLEY ORTEGA BUENO a quien amo demasiado y quien ha sido un pilar importante en mi vida, gracias por su amor, su confianza y apoyo.*

*Gracias a las personas que ofrecieron su ayuda para cumplir este sueño, no sé cómo pagarles.*

**ELKIN DARÍO FLÓREZ BARRETO**

## DEDICATORIA

*Cuando llegue a la universidad el anhelo más grande era el saber que se sentía el ser profesional y la verdad es algo que queda pequeño para expresarlo con palabras. En este camino siempre hubo subidas y bajadas pero gracias a la ayuda de Dios tuve la fe, la fortaleza y sabiduría para saber afrontar las dificultades cada vez que se presentaban. Gracias chuchito.*

*A mis padres, sin sus sueños y esfuerzos este triunfo no existiría, siempre me han forjado a luchar por lo quiero y me guían con sus consejos. Me enseñaron que no hay meta suficientemente alta para aquellos llenos de fe y esperanzas en un futuro mejor.*

*A mi hermano Luis, por su ejemplo de fortaleza y dedicación. Te doy las gracias por haber confiado en mí y por estar conmigo en este proceso tan importante para mi vida. Nada de esto hubiera sido posible sin tu apoyo. Este triunfo te lo dedico con toda mi alma, porque sabes que este sueño no solo es mío sino nuestro.*

*A mis hermanos, Carlos, Gregorio y alba con los que cuento siempre y en todo lugar, los quiero y debemos estar orgullosos por la gran familia que DIOS nos regalo.*

*A mi compañero Elkin Flórez, por su amistad durante toda la carrera, por la paciencia que mostró durante todo el proyecto y por esforzarse para terminar exitosamente esta etapa de nuestras vidas.*

*A todos mis amigos de universidad, que desinteresadamente me brindaron buenos ratos y con los cuales compartimos momentos de estudio y también de parranda. Gracias por haberme escuchado, por animarme en los momentos difíciles y por haberme hecho sentir bien cuando las cosas no iban saliendo de lo mejor; no olviden que pueden contar conmigo pa' las que sea. "Se les quiere un montón parceritos".*

*A todas las personas que me conocieron y permitieron que yo las conociera y me brindaron su amistad, gracias porque los mejores días de mi carrera los viví al lado de ustedes.*

*Finalmente a toda mi familia, en especial a mis tías, Zoraida, Cenaida y Mercedes; a mis primos, Julián Jefferson, Laura y Carolina; a mi cuñado Víctor y mis sobrinos, Javier, Sebastián, Silvia y Luisa. Gracias por brindarme su alegría que me ayudo para poder llevar de una mejor manera todos los percances presentados y por ayudarme cada día a salir adelante; Mi felicidad es su felicidad y mis triunfos son los suyos.*

ANDRES FERNANDO BAUTISTA CUADROS

## **AGRADECIMIENTOS**

Sería interminable la lista de las personas que han contribuido no solo en la realización de este proyecto, sino en el crecimiento de nuestra vida profesional y personal durante el paso por la Universidad Industrial de Santander. Sin embargo, agradecemos a continuación a aquellas personas que contribuyeron en la culminación del presente proyecto:

A nuestros padres por su amor y apoyo incondicional en este sueño.

A nuestro director de proyecto, M.Sc. Emiliano Ariza León, por brindarnos su conocimiento y apoyo incondicional; además, por darnos su confianza y ánimo para culminar exitosamente esta etapa de nuestras vidas.

A nuestro Co-Director, Ph.D. Daniel Ricardo Molina Velasco por compartir su conocimiento con nosotros y proporcionarnos información acerca de nuestros productos de investigación.

Al profesor Custodio por compartir su conocimiento.

A la escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos utilizar el Laboratorio de Lodos y Cementos, especialmente a Alexander Beltrán, por compartir con nosotros su experiencia, su tiempo y brindarnos su colaboración en el uso del laboratorio.

Al grupo de Investigación en campos maduros.

Finalmente, a todos nuestros amigos, con quienes hemos compartido alegrías y tristezas durante toda la carrera; gracias por brindarnos SU AMISTAD... No olviden que es el regalo más perdurable y valioso que conservaremos siempre en nuestros corazones.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>22</b>
<b>1. GENERALIDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN</b>	<b>23</b>
1.1    DEFINICIÓN	23
1.2    FASES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN	23
1.2.1    Fase continua de los lodos.	24
1.2.2    Fase discontinua de los lodos.	24
1.2.3    Fase sólida de los lodos.	24
1.3    FUNCIONES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN	25
1.4    CLASIFICACIÓN DE LODOS DE PERFORACIÓN	27
1.4.1    Lodos base agua.	27
1.4.2    Lodos base aceite.	27
1.4.3    Lodos neumáticos.	28
1.5    COMPONENTES DE UN LODO BASE AGUA	28
1.5.1    Agua.	28
1.5.2    Densificantes.	29
1.5.3    Viscosificantes.	29
1.5.4    Dispersantes.	29
1.5.5    Controlador de filtrado.	30
1.5.6    Surfactantes.	30
1.5.7    Controladores de pH.	30
<b>2. PROPIEDADES DEL LODO Y SU MEDICIÓN</b>	<b>31</b>
2.1    DENSIDAD	31
2.2    VISCOSIDAD	31
2.2.1    Viscosidad aparente.	32
2.2.2    Viscosidad plástica.	32
2.3    PUNTO DE CEDENCIA (Yield Point)	32
2.4    FUERZA GEL	33

2.5	FILTRACION Y CONTROL DE FILTRADO	33
2.6	pH	34
<b>3.</b>	<b>VISCOSIFICANTES Y CONTROLADORES DE FILTRADO EN LODOS DE PERFORACIÓN</b>	<b>35</b>
3.1	VISCOSIFICANTES	35
3.1.1	Rendimiento de viscosificantes.	35
3.1.2	Importancia y aplicación.	36
3.1.3	Calculo del rendimiento de un viscosificante.	36
3.1.4	Agentes viscosificantes.	37
3.2	CONTROL DE FILTRADO	45
3.2.1	Importancia y aplicación.	46
3.2.2	Medición de las pérdidas de filtrado.	46
3.2.3	Problemas relacionados con la invasión excesiva de filtrado.	48
3.2.3	Problemas relacionados con el espesor excesivo de la torta.	48
3.2.4	Factores que afectan el filtrado.	49
3.2.5	Agentes de control de filtrado.	50
3.3	POLIMEROS	56
3.3.1	Introducción química.	56
3.3.2	Clasificación de los polímeros.	57
3.3.3	Factores que afectan a los polímeros.	59
3.3.4	Degradación de los polímeros.	60
3.3.5	Beneficios de los polímeros líquidos.	60
<b>4.</b>	<b>GENERALIDADES DEL ALMIDON DE YUCA</b>	<b>62</b>
4.1	LA YUCA	62
4.1.1	Características.	63
4.1.2	Morfología.	64
4.2	ALMIDÓN	64
4.3	PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA	70
4.4	PROCESO DE TRANSFORMACION DEL ALMIDON	72
4.5	APLICACIONES EN LA INDUSTRIA	76
4.6	PRODUCCIÓN DE YUCA EN COLOMBIA	76
4.7	ANTECEDENTES EN INVESTIGACIÓN CON ALMIDÓN DE YUCA	81

<b>5. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO ADITIVO EN LODOS DE PERFORACIÓN</b>	<b>83</b>
5.1 IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE VARIABLES	85
5.2 SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	87
5.2.1 Caracterización del almidón de yuca hidrolizado.	88
5.2.2 Prueba de Degradación.	89
5.2.3 Prueba de Compatibilidad.	89
5.3 PRUEBA DE RENDIMIENTO	90
5.4 PRUEBA DEL EFECTO DEL PH SOBRE LA VISCOSIDAD	91
5.5 PRUEBA DEL EFECTO DE LA SAL SOBRE LA VISCOSIDAD	92
5.6 PRUEBA DE EXTENSIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA BENTONITA	93
5.7 PRUEBA DE CONTROLADOR DE FILTRADO	94
5.7.1 Pruebas para el lodo base.	99
<b>6. DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>102</b>
6.1 CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA	102
6.2 PRUEBA DE DEGRADACIÓN	104
6.3 PRUEBA DE COMPATIBILIDAD	106
6.4 PRUEBA DE RENDIMIENTO	111
6.5 PRUEBA DEL EFECTO DEL pH SOBRE LA VISCOSIDAD	118
6.6 PRUEBA DEL EFECTO DE LA SAL SOBRE LA VISCOSIDAD	118
6.7 RENDIMIENTOS DE ALGUNOS VISCOSIFICANTES COMERCIALES	124
6.8 PRUEBA DE EXTENSIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA BENTONITA	126
6.9 PRUEBAS DEL ALMIDÓN COMO CONTROLADOR DE FILTRADO	139
6.9.1 Pruebas para el lodo base.	139
6.9.2 Prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado.	143
6.10 ANÁLISIS DE COSTOS	160
6.10.1 Precios de agentes viscosificantes y controladores de filtrado.	160

6.10.2	Costos para la prueba de rendimiento.	161
6.10.3	Costos para pruebas de control del filtrado.	161
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>163</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>165</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>166</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Agentes viscosificantes comerciales. ....	38
<b>Tabla 2.</b> Agentes comerciales de control de filtrado. ....	51
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de polímeros. ....	59
<b>Tabla 4.</b> Factores que afectan los polímeros. ....	59
<b>Tabla 5.</b> Tipos de degradaciones en los polímeros. ....	60
<b>Tabla 6.</b> Taxonomía de la yuca. ....	63
<b>Tabla 7.</b> Relación amilosa / amilopectina según la procedencia del almidón. ...	69
<b>Tabla 8.</b> Propiedades generales del almidón de yuca. ....	70
<b>Tabla 9.</b> Área sembrada de yuca para uso industrial por departamentos. ....	78
<b>Tabla 10.</b> Producción de yuca para uso industrial por departamentos. ....	79
<b>Tabla 11.</b> Destino de la producción de yuca para uso industrial según el volumen producido por departamentos. ....	80
<b>Tabla 12.</b> Factores influyentes. ....	85
<b>Tabla 13.</b> Identificación y definición de variables. ....	87
<b>Tabla 14.</b> Formato para la prueba de compatibilidad del almidón de yuca. ....	90
<b>Tabla 15.</b> Formato de observaciones para el almidón de yuca. ....	90
<b>Tabla 16.</b> Formato de la prueba de rendimiento del almidón de yuca en agua dulce. ....	91
<b>Tabla 17.</b> Formato de la prueba del efecto del pH sobre la viscosidad. ....	92
<b>Tabla 18.</b> Formato de la prueba del efecto de la sal sobre la viscosidad. ....	93
<b>Tabla 19.</b> Formato de la prueba de extensión de las propiedades de la bentonita. ....	94
<b>Tabla 20.</b> Formato de las propiedades del lodo base. ....	99
<b>Tabla 21.</b> Formato de pérdidas de filtrado con el tiempo para el lodo base. ....	99
<b>Tabla 22.</b> Formato de la prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado. ....	100
<b>Tabla 23.</b> Formato de la prueba de extensión de filtrado. ....	101
<b>Tabla 24.</b> Características de los almidones de yuca. ....	103

<b>Tabla 25.</b> Formato de observación del almidón de yuca G 8060.....	105
<b>Tabla 26.</b> Formato de observación del almidón de yuca MDX 060. ....	105
<b>Tabla 27.</b> Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + Bentonita.	107
<b>Tabla 28.</b> Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + CaCO <sub>3</sub> . ...	107
<b>Tabla 29.</b> Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + SAPP.....	108
<b>Tabla 30.</b> Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + NaOH.....	108
<b>Tabla 31.</b> Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + Bentonita. .....	109
<b>Tabla 32.</b> Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + CaCO <sub>3</sub> .	109
<b>Tabla 33.</b> Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + SAPP...	110
<b>Tabla 34.</b> Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + NaOH. .	110
<b>Tabla 35.</b> Análisis para el agua dulce.....	111
<b>Tabla 36.</b> Prueba de rendimiento en agua dulce para el almidón MDX 060...	112
<b>Tabla 37.</b> Prueba de rendimiento en agua dulce para el almidón G 8060.....	113
<b>Tabla 38.</b> Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % para los almidones.....	115
<b>Tabla 39.</b> Análisis estadístico del rendimiento del almidón de yuca MDX 060 en agua dulce.....	117
<b>Tabla 40.</b> Análisis estadístico del rendimiento del almidón de yuca G 8060 en agua dulce.....	117
<b>Tabla 41.</b> Almidón MDX 060 en un ambiente salino saturado (40 lb / bbl de sal). .....	119
<b>Tabla 42.</b> Bentonita en un ambiente salino saturado (40 lb / bbl de sal). ....	120
<b>Tabla 43.</b> Análisis estadístico del almidón MDX 060 + 40 lb / bbl de sal. ....	122
<b>Tabla 44.</b> Análisis estadístico de la bentonita + 40 lb / bbl de sal.....	123
<b>Tabla 45.</b> Propiedades de algunos viscosificantes comerciales.....	124
<b>Tabla 46.</b> Prueba de extensión de las propiedades de la bentonita. ....	126
<b>Tabla 47.</b> Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % para la bentonita. .....	129
<b>Tabla 48.</b> Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % - MDX 060. ...	130
<b>Tabla 49.</b> Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % - G 8060.....	131

<b>Tabla 50.</b> Datos reales a datos normalizados para la bentonita.....	134
<b>Tabla 51.</b> Datos reales a datos normalizados para cada tipo de almidón de yuca.....	135
<b>Tabla 52.</b> Rendimientos de los productos. ....	139
<b>Tabla 53.</b> Resultados de las propiedades del lodo base. ....	140
<b>Tabla 54.</b> Análisis estadístico de las propiedades del lodo base.....	141
<b>Tabla 55.</b> Resultados de las pérdidas de filtrado para el lodo base. ....	141
<b>Tabla 56.</b> Variabilidad del 85 % - Pérdidas de filtrado del lodo base.....	142
<b>Tabla 57.</b> Análisis estadístico de las pérdidas de filtrado para el lodo base...	143
<b>Tabla 58.</b> Resultados de la prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado.....	144
<b>Tabla 59.</b> Resultados de las pruebas de pérdidas de filtrado.....	146
<b>Tabla 60.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal.....	148
<b>Tabla 61.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal – Pac-L. ....	148
<b>Tabla 62.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal – G 8060...	148
<b>Tabla 63.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal – MDX 060.	149
<b>Tabla 64.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal.....	151
<b>Tabla 65.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal - Pac-L. ....	151
<b>Tabla 66.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal - G 8060.....	151
<b>Tabla 67.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal - MDX 060..	152
<b>Tabla 68.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso.....	154
<b>Tabla 69.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso - Pac-L. ...	154
<b>Tabla 70.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso - G 8060..	154
<b>Tabla 71.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso - MDX 060. ....	155
<b>Tabla 72.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl <sub>2</sub> .....	157
<b>Tabla 73.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl <sub>2</sub> - Pac-L...	157
<b>Tabla 74.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl <sub>2</sub> - G 8060. ....	157
<b>Tabla 75.</b> Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl <sub>2</sub> - MDX 060. ....	158

<b>Tabla 76.</b> Precio de viscosificantes y controladores de filtrado. ....	160
<b>Tabla 77.</b> Costos para la prueba de rendimiento.....	161
<b>Tabla 78.</b> Costos para la prueba de control de filtrado. ....	162

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura de la bentonita. ....	39
<b>Figura 2.</b> Estructura molecular de la celulosa. ....	41
<b>Figura 3.</b> Estructura molecular de la carboximetilcelulosa. ....	41
<b>Figura 4.</b> Estructura molecular de la goma guar. ....	43
<b>Figura 5.</b> Estructura molecular de la goma xanthan. ....	44
<b>Figura 6.</b> Estructura de la molécula de almidón. ....	53
<b>Figura 7.</b> Tipos de cadenas en un polímero. ....	57
<b>Figura 8.</b> Yuca. ....	63
<b>Figura 9.</b> Modelo tridimensional de la glucosa. ....	65
<b>Figura 10.</b> Estructura química de la amilosa. ....	67
<b>Figura 11.</b> Estructura helicoidal de la amilosa. ....	67
<b>Figura 12.</b> Estructura química de la amilopectina. ....	68
<b>Figura 13.</b> Estructura de árbol de la amilopectina. ....	68
<b>Figura 14.</b> Diagrama del proceso general de extracción de almidón de yuca. .	72
<b>Figura 15.</b> Proceso de hidrólisis enzimática. ....	74
<b>Figura 16.</b> Principio del proceso de hidrólisis de los cereales distintos del maíz. .....	75
<b>Figura 17.</b> Área sembrada de yuca para uso industrial por departamentos. ....	78
<b>Figura 18.</b> Producción de yuca para uso industrial por departamentos. ....	79
<b>Figura 19.</b> Destino de la producción de yuca para uso industrial según el volumen producido por departamentos. ....	80
<b>Figura 20.</b> Almidones de yuca hidrolizados. ....	103
<b>Figura 21.</b> Almidón de yuca G 8060 y MDX 060 para observación de degradación. ....	104
<b>Figura 22.</b> Prueba de compatibilidad para el almidón G 8060. ....	106
<b>Figura 23.</b> Prueba de compatibilidad para el almidón MDX 060. ....	106
<b>Figura 24.</b> Curva de rendimiento - Almidón de yuca MDX 060. ....	112
<b>Figura 25.</b> Curva de rendimiento - Almidón de yuca G 8060. ....	114

<b>Figura 26.</b> Variabilidad del 85 % - Almidón MDX 060. ....	116
<b>Figura 27.</b> Variabilidad del 85 % - Almidón G 8060.....	116
<b>Figura 28.</b> Curva de rendimiento del almidón MDX 060 + 40 lb / bbl de sal...	119
<b>Figura 29.</b> Curva de rendimiento de bentonita + 40 lb / bbl de sal. ....	121
<b>Figura 30.</b> Rendimiento de algunos viscosificantes comerciales. ....	125
<b>Figura 31.</b> Curva de rendimiento de la bentonita. ....	128
<b>Figura 32.</b> Variabilidad del 85 % - Bentonita. ....	129
<b>Figura 33.</b> Curva de rendimiento de la bentonita + Almidón MDX 060. ....	130
<b>Figura 34.</b> Curva de rendimiento de la bentonita + Almidón G 8060.....	131
<b>Figura 35.</b> Curva de extensión de las propiedades de la bentonita.....	132
<b>Figura 36.</b> Curva de extensión de las propiedades de la bentonita ampliada. .....	133
<b>Figura 37.</b> Superficie de respuesta estimada para la viscosidad aparente. ...	136
<b>Figura 38.</b> Contorno de superficie de respuesta estimada para la viscosidad aparente. ....	137
<b>Figura 39.</b> Rendimiento de los almidones comparados con los viscosificantes comerciales. ....	138
<b>Figura 40.</b> Torta o Cake del lodo base. ....	140
<b>Figura 41.</b> Curva de las pérdidas de filtrado para el lodo base. ....	142
<b>Figura 42.</b> Variabilidad del 85 % - Pérdidas de filtrado del lodo base. ....	143
<b>Figura 43.</b> Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con sal.....	149
<b>Figura 44.</b> Retorta del lodo contaminado con sal y sus tratamientos.....	150
<b>Figura 45.</b> Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con cal.....	152
<b>Figura 46.</b> Retorta del lodo contaminado con cal y sus tratamientos. ....	153
<b>Figura 47.</b> Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con yeso.....	155
<b>Figura 48.</b> Retorta del lodo contaminado con yeso y sus tratamientos. ....	156
<b>Figura 49.</b> Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con CaCl <sub>2</sub> . ....	158
<b>Figura 50.</b> Retorta del lodo contaminado con CaCl <sub>2</sub> y sus tratamientos. ....	159

## RESUMEN

**TÍTULO: FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDON DE YUCA COMO ADITIVO EN LODOS DE PERFORACIÓN<sup>1</sup>.**

**AUTORES:**

Elkin Darío Flórez Barreto  
Andrés Fernando Bautista Cuadros<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Almidón de Yuca, Hidrólisis Enzimática, Agentes Viscosificantes, Agentes de Control de Filtrado, Prueba de Compatibilidad, Prueba de Degradación, Prueba de Rendimiento, Prueba de Control de Filtrado.

**DESCRIPCION:**

El almidón es un polímero que se utiliza ampliamente en todo tipo de lodo de perforación base agua y es uno de los principales componentes en los fluidos de perforación.

Las funciones principales del almidón son la reducción de la pérdida de líquidos y el control de la reología, de aquí el enfoque que se le dio a esta investigación. En los fluidos de perforación, el polímero interactúa con partículas sólidas para mejorar el sello de la filtración en el pozo, y para proporcionar la reología necesaria. Las razones para la selección del almidón de yuca son su versatilidad, y en comparación con muchos biopolímeros, su bajo costo relativo.

En este trabajo se presenta los resultados de laboratorio obtenidos del trabajo experimental de dos tipos de almidones de yuca (MDX 060 y G 8060) los cuales se diferencian de acuerdo a su proceso de modificación el cual fue por hidrólisis enzimática; este proceso es necesario ya que los almidones naturales no son solubles en agua fría. Los resultados muestran que el almidón MDX 060 es un buen controlador de filtrado en lodos contaminados con yeso como consecuencia de esta modificación.

Este informe está dividido en seis secciones o capítulos. Los dos primeros capítulos describen generalidades y propiedades de los lodos de perforación, el tercer capítulo se enfoca en los viscosificantes y controladores de filtrado (características, propiedades y tipos), el cuarto capítulo hace referencia a las generalidades del almidón de yuca y el quinto capítulo contiene información concerniente con el diseño experimental del proyecto donde se describen las diferentes pruebas a realizar y finalmente, el sexto capítulo su correspondiente desarrollo con su respectivo análisis de los datos obtenidos.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. M.Sc. Emiliano Ariza León (DIRECTOR). Ph.D. Daniel Molina Ricardo Velasco (CO-DIRECTOR).

## ABSTRACT

**TITLE: FEASIBILITY OF USING CASSAVA STARCH AS A DRILLING FLUID ADDITIVE<sup>3</sup>.**

### **AUTHORS:**

Elkin Darío Flórez Barreto  
Andrés Fernando Bautista Cuadros<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Cassava Starch, Enzymatic Hydrolysis, Viscosifiers Agents, Filtration Control Agents, Compatibility Test, Degradation Test, Viscosity Yield Test, Loss Control Test.

### **DESCRIPTION:**

Starch is a polymer widely used in all types of water-based drilling mud and is a major component in drilling fluids.

The main functions of the starch are reducing fluid loss and rheology control, hence the approach that was given to this research. In drilling fluids, the polymer interact with solid particles to improve the seal of the leak in the well, and provide the necessary rheology. The reasons for the selection of cassava starch are its versatility, and in comparison with many biopolymers, low relative cost.

This paper presents the laboratory results obtained from the experimental work of two types of cassava starch (MDX 060 and G 8060) which differ according to the process of change which was by enzymatic hydrolysis, this process is necessary because the natural starches are insoluble in cold water. The results show that starch MDX 060 is a good filtration control agent in muds contaminated with gypsum as a result of this change.

This report is divided into six sections or chapters. The first two chapters describe generalities and properties of drilling fluids, the third chapter focuses on the viscosifiers and filtration control agents (characteristics, properties and types), the fourth section covers the generalities of cassava starch and the fifth chapter contains information relative to the experimental design of the project which describes the various tests performed and finally, the sixth chapter of its development for their respective analysis of the data.

---

<sup>3</sup> Thesis of Grade

<sup>4</sup> Faculty of Physycal-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. M.Sc. Emiliano Ariza León (DIRECTOR). Ph.D. Daniel Ricardo Molina Velasco (CO-DIRECTOR).

## INTRODUCCIÓN

La selección del tipo del fluido de perforación y de sus propiedades se debe realizar teniendo en cuenta los objetivos básicos que incurren en la perforación, como son perforar y completar adecuadamente los pozos a un mínimo costo y facilitar la adquisición eficiente de todos los datos necesarios para propósitos de evaluación.

Debido a esto, es de gran importancia incursionar en la investigación y estudio de nuevos productos biodegradables como el caso del almidón de yuca, que suplan las necesidades de la industria petrolera el cual estaría representado en una reducción de costos y mejor eficiencia del proceso además de ofrecer al medio ambiente mejores alternativas para la preservación de los recursos naturales tratando siempre de reducir el impacto ambiental sobre el medio.

Esto con el propósito de que en próximos estudios que se realicen dentro de este campo se puedan desarrollar aditivos con excelentes características para su funcionamiento en un lodo de perforación.

El presente trabajo se desarrolla para determinar la factibilidad del uso de almidón de yuca hidrolizado como aditivo en lodos de perforación. En esta investigación se realizaron pruebas de rendimiento y control de filtrado en lodos base agua, bajo diferentes esquemas con el fin de evaluar la eficacia de los productos y comparar dichos resultados con aditivos comerciales.

## **1. GENERALIDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN**

### **1.1 DEFINICIÓN**

Se denomina lodo de perforación o simplemente lodo a un fluido de perforación que es fundamentalmente líquido que circulan en pozos de petróleo y gas para limpiar y acondicionar el hoyo, lubricar la broca y equilibrar la presión de formación, además de medio de transporte para los ripios.

Un lodo ideal es aquel que a baja velocidad, tiene una alta viscosidad para que pueda cumplir la función de suspender y transportar los ripios, además de que sea el más económico en la perspectiva total de seguridad, costos de perforación y, eventualmente, costos de producción.

Debido a los problemas presentados en las operaciones de perforación rotaria, ha sido necesario investigar e introducir nuevos productos para ser usados como aditivos en los lodos de perforación.

### **1.2 FASES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN<sup>5</sup>**

Un lodo es, típicamente, una suspensión de sólidos y, posiblemente también de líquidos o gases, en un líquido. El líquido en el cual todos los materiales están suspendidos es la fase continua del lodo. Las partículas sólidas o glóbulos líquidos suspendidos en él, constituyen la fase discontinua del lodo.

---

<sup>5</sup> ECAPETROL – Escuela de Capacitación Petrolera. Química de lodos.

### **1.2.1 Fase continua de los lodos.**

Es el líquido en el cual todos los materiales están suspendidos. La fase continua de un lodo de base agua es agua y de un fluido base aceite es el aceite. Las sales disueltas en el agua son también parte de la fase continua.

### **1.2.2 Fase discontinua de los lodos.**

Los glóbulos de petróleo emulsionados en un lodo de base agua viscosifican el lodo y reducen su densidad. El petróleo del lodo puede originarse en las formaciones perforadas. Más a menudo, cuando se encuentra en cantidades significativas de petróleo en un lodo base agua, se trata de petróleo adicionado deliberadamente para reducir la fricción mecánica, reducir la filtración a través de las paredes, liberar una tubería aprisionada por presión diferencial o, en casos pocos frecuentes y producir un lodo más liviano que el agua.

El agua emulsionada de un lodo base aceite, lo hace mas viscoso. La proporción petróleo / agua en un lodo de base aceite debe ser cuidadosamente controlada. La entrada de agua de formación en este tipo de lodo lo hace más viscoso y, si es suficientemente abundante, lo desestabiliza.

### **1.2.3 Fase sólida de los lodos.**

Los sólidos desempeñan un papel tan importante en la condición y mantenimiento de un lodo que se le asigna una fase aparte, aun cuando todas las partículas sólidos que hay en un lodo pertenecen a su fase discontinua.

La inestabilidad de un lodo aumenta a medida que el porcentaje de sólidos (en volumen) se eleva. El tratamiento químico puede incrementar la capacidad de un lodo para tolerar sólidos, pero solo hasta cierto punto. Muchos problemas de los lodos son causados por la falta de un control adecuado de sólidos.

### 1.3 FUNCIONES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN<sup>6</sup>

Son muchos los requerimientos para obtener un fluido de perforación óptimo. Según el Instituto Americano del Petróleo – API, define un fluido de perforación como un fluido en circulación para llevar a cabo cualquier función requerida durante una operación.

Además se tiene el concepto de James Lummus: “Un fluido de perforación óptimo es aquel en el cual la tasa de flujo necesaria para limpiar el pozo cumple con un caballaje hidráulico adecuado para limpiar la broca a un peso y una velocidad de rotación predeterminada para dar el costo más bajo. Dada esta combinación de variables, se puede obtener un pozo estable que cumple con el criterio de evaluación de formación y que ha alcanzado el objetivo deseado”<sup>7</sup>.

Las principales funciones de un lodo de perforación:

- ❖ **Transportar los recortes de perforación y los derrumbes a la superficie.** La acumulación de material sólido en el anular debido a una ineficiente limpieza del pozo causa un aumento en la torsión, en el arrastre, y en la presión hidrostática, lo que puede generar aprisionamiento de la tubería, reducción en la tasa de penetración y pérdida de circulación.
- ❖ **Mantener en suspensión los recortes y derrumbes, en el espacio anular, cuando se detiene la circulación.** El lodo tiene la capacidad de formar una estructura de tipo gel cuando no está fluyendo para evitar que los recortes y derrumbes caigan hacia el fondo del pozo.

---

<sup>6</sup> Indagado de: Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Rodríguez Bermúdez, Eliserio.

<sup>7</sup> Indagado de: Drilling Fluids Optimization. James L. Lummus and J.J. Azar.

- ❖ **Dar sostén a las paredes del pozo.** Evitar que la formación caiga en el interior del pozo depende de la naturaleza de la misma y del lodo que se use durante la perforación. El lodo debe formar una torta elástica y de un espesor adecuado para que ayude a sostener las paredes del hueco.
- ❖ **Controlar la presión de formación para evitar amagos de reventón y pérdidas humanas y materiales.** El agua, el gas y el petróleo que se encuentran en el subsuelo están bajo gran presión. Esta presión debe ser sobre-balanceada para evitar un flujo incontrolado de esos fluidos de formación en el interior del pozo. El control se logra a merced de un mantenimiento de una presión hidrostática suficiente en el anular. La presión hidrostática es directamente proporcional a la densidad del lodo y a la altura de la columna de lodo.
- ❖ **Enfriar y lubricar la broca y la sarta.** A medida que la broca raspa el fondo del pozo y que la sarta rota contra las paredes del pozo, se genera calor. El lodo debe absorber ese calor y conducirlo hacia fuera. Sus propiedades lubricantes permiten una mayor vida útil de la broca, una disminución en la torsión y en el arrastre, una menor presión de bombeo, menor desgaste por fricción en la sarta y debe ser más o menos denso. Cualquier lodo líquido desempeñará esta función al circular.
- ❖ **Ayudar a suspender el peso de la sarta y del revestimiento.** El empuje ascendente del lodo sostiene parcialmente la tubería ya que gran peso de la sarta (hasta más de 200 toneladas) puede causar una gran tensión o esfuerzo sobre el equipo de superficie.
- ❖ **Transmitir potencia hidráulica sobre la formación por debajo de la broca.** Esto permite que la superficie por debajo de la broca esté libre de recortes, de lo contrario la broca los seguirá re-triturando, reduciendo así la velocidad de penetración.

- ❖ **Proveer de un medio adecuado para tomar los registros del pozo.**  
Para esto se requiere que el lodo sea buen conductor de la electricidad y que presente propiedades eléctricas diferentes de los fluidos de la formación.

## **1.4 CLASIFICACIÓN DE LODOS DE PERFORACIÓN**

Los fluidos de perforación se clasifican comúnmente de acuerdo a un fluido base en tres grupos principales: fluido base agua, fluido base aceite y fluidos neumáticos.

### **1.4.1 Lodos base agua.**

Son aquellos que tienen como fase continua agua dulce o salada, en el cual ciertos materiales se disuelven y otros quedan en suspensión. Por lo general la fase dispersa es bentonita o atapulgita. Estos lodos son los más usados en la industria por ser los más simples y menos costosos.

Los lodos base agua varían desde los lodos no tratados hasta los más intensamente tratados, como son los lodos inhibidos que reducen o inhiben la interacción entre lodo y ciertas formaciones perforadas.

### **1.4.2 Lodos base aceite.**

Un lodo base aceite es una emulsión o mezcla de dos fluidos inmiscibles, es decir, líquidos que no se mezclan bajo condiciones normales y, se caracteriza porque su parte líquida continua es petróleo y la fase dispersa consta de pequeñas gotas.

Para hacer la emulsión más estable, es necesario el uso de un agente emulsificante. El tipo de emulsión que se forma puede ser normal o inversa y depende de las características del agente emulsificante.

- ❖ **Lodos de emulsión normal.** En estos lodos la fase continua es el agua y la fase dispersa es el aceite.
  
- ❖ **Lodos de emulsión inversa.** En estos lodos la fase continua es el aceite y la fase dispersa es el agua. Se usan especialmente para tomar muestra de roca representativa del yacimiento y para perforar las zonas productoras de hidrocarburos.

### **1.4.3 Lodos neumáticos.**

Este tipo de lodo se caracteriza porque la fase continua es aire u otro gas (gas seco o mezcla de gases). A este tipo de fluidos también se le conoce como “Fluido de perforación reductores de presión”, debido a que su gradiente de presión es mucho menor que el de los lodos base aceite y por consiguiente menor que el de los lodos base agua.

El propósito original para el uso de este tipo de fluidos es el de aminorar las pérdidas de fluido hacia la formación y reducir el daño a esta, además de aumentar la tasa de penetración en zonas de rocas muy duras.

## **1.5 COMPONENTES DE UN LODO BASE AGUA**

### **1.5.1 Agua.**

Es la sustancia más importante involucrada en los lodos base agua. En todos los tiempos de la perforación es el componente que se va a encontrar en mayor

cantidad. Esta agua puede ser añadida al lodo en superficie o también puede ser agua proveniente de la formación.

### **1.5.2 Densificantes.**

Cualquier sustancia que sea más densa que el agua y que no afecte otras propiedades del lodo, puede ser utilizada como agente densificante. Los productos más usados en la industria petrolera son la barita y el carbonato de calcio.

### **1.5.3 Viscosificantes.**

La principal preocupación de un ingeniero de lodos desde el punto de vista reológico se encuentra relacionada con la capacidad de suspensión y de transporte de los ripios, y con el impacto de la viscosidad sobre las pérdidas de presión en el sistema circulatorio.

Para lograr una buena capacidad de limpieza y de suspensión de los sólidos en el espacio anular durante los periodos que no hay circulación, se requiere de una viscosidad efectiva adecuada.

### **1.5.4 Dispersantes.**

Son aquellos aditivos usados en lodos de perforación cuya principal función es reducir la viscosidad y resistencia al gel. En lodos de agua dulce se usan como dispersantes los fosfatos inorgánicos complejos (polifosfatos) y los adelgazantes orgánicos tales como taninos, lignitos y lignosulfonatos. Estos últimos se usan en compañía del hidróxido de sodio para lograr mayor efectividad.

### **1.5.5 Controlador de filtrado.**

Ayudan a mantener un pozo estable minimizando los daños a la formación. Generalmente se utilizan almidones o polímeros.

### **1.5.6 Surfactantes.**

Materiales que tienden a concentrarse en la interfase. Se emplea en lodos para controlar el grado de emulsificación, adición, dispersión, tensión en la interfase, espuma, los efectos antiespumantes, humectación, etc.

### **1.5.7 Controladores de pH.**

El principal agente controlador de pH usado en lodos de perforación base agua, es el hidróxido de sodio o soda caustica. La cantidad de soda caustica necesaria para el control del pH depende de la influencia de varios factores: pH del lodo antes de hacer las adiciones de soda caustica, cantidad y tipo de aditivos incorporados al sistema de lodo, tipo y cantidad de las formaciones perforadas, cantidad y calidad de las adiciones de agua, contaminantes presentes, etc.

## **2. PROPIEDADES DEL LODO Y SU MEDICIÓN**

Un lodo de perforación debe tener las propiedades y los componentes adecuados para llevar a cabo un correcto funcionamiento. En este capítulo se dará una descripción acerca de las propiedades involucradas dentro de la investigación y la forma como se miden estas.

### **2.1 DENSIDAD**

Define la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes del pozo, controlando de este modo las presiones litostática e hidrostática existentes en las formaciones perforadas. Se determina pesando en una balanza un volumen conocido de lodo. La escala de la balanza (Baroid) da directamente el valor de la densidad del lodo, esta puede ser expresada en lb / gal, lb / ft<sup>3</sup>, lb / bbl, peso específico, o gradiente de presión (psi / ft).

### **2.2 VISCOSIDAD<sup>8</sup>**

Es la resistencia o fricción interna de un fluido a circular cuando es forzado a fluir. Define la capacidad del lodo de lograr una buena limpieza de perforación, de mantener en suspensión y desalojar los detritus y de facilitar su decantación en las balsas o tamices vibrantes. Es la resultante de las fuerzas mecánicas o de rozamiento y se debe a presencia de sólidos.

---

<sup>8</sup> Indagado de: Drilling Fluids Optimization. James L. Lummus and J.J. Azar.

### **2.2.1 Viscosidad aparente.**

Es la viscosidad que un fluido parece tener en un instrumento dado y a una tasa definida de corte. Es una función de la viscosidad plástica y del punto de cedencia. Se toma como punto de comparación para determinar la eficiencia de un proceso de optimización de un fluido de perforación. Se da en unidades de centipoises. Tal como se determina con el viscosímetro Fann, es igual a la mitad de la lectura a 600 RPM.

### **2.2.2 Viscosidad plástica.**

Es la medida de la resistencia interna al flujo debido a la interacción de los sólidos en el fluido. Se atribuye a la cantidad, tipo y tamaño de los sólidos presentes en un fluido dado, se expresa en centipoises. Cuando se emplea el viscosímetro de Fann, la viscosidad plástica se determina sustrayendo la lectura a 300 RPM de la lectura a 600 RPM.

### **2.3 PUNTO DE CEDENCIA (Yield Point)**

Es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido que resultan de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas medidas bajo las condiciones de flujo. Por lo tanto el punto de cedencia es una medida cuantitativa de la resistencia al flujo causadas por estas mismas fuerzas.

El punto de cedencia es medido en el viscosímetro Fann y es el resultado de la diferencia entre las lecturas a un esfuerzo de corte de 300 RPM y la viscosidad plástica, expresando su valor en  $\text{lb} / 100 \text{ft}^2$ .

## **2.4 FUERZA GEL**

Primero se debe mencionar que la tixotropía es la propiedad que tienen las suspensiones bentoníticas de pasar de gel a sólido mediante agitación y recupere sus propiedades. Gracias a esta propiedad, independiente de la densidad, los lodos colaboran en el mantenimiento de las paredes de la perforación.

La fuerza gel es la medida de las fuerzas de atracción que poseen los lodos en condiciones estáticas; en consecuencia es una medida de las propiedades tixotrópicas de los lodos de perforación.

Para mantener una medida de tixotropía presente en un lodo se toman dos lecturas en el viscosímetro Fann a una tasa de corte de 3 RPM, la primera con 10 segundos de reposo del lodo (Gel inicial) y la segunda con 10 minutos de reposo (Gel final).

Además para que un lodo bentonítico pase de sólido a gel inmediatamente después de dejarlo de agitar, se requieren concentraciones del orden del 20% en peso.

## **2.5 FILTRACION Y CONTROL DE FILTRADO**

La filtración se refiere a la acción mediante la cual la presión diferencial hace entrar a la fase líquida del lodo de perforación dentro de una formación permeable.

El objetivo de un control adecuado de las pérdidas de filtrado es formar una torta lisa, delgada y resistente en forma rápida sobre la superficie de las formaciones permeables e impedir una excesiva pérdida de filtrado. Además el filtrado debe ser compatible con la formación y con los fluidos de la misma.

## 2.6 pH

Son las condiciones de equilibrio químico de un lodo que 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.

La estabilidad de la suspensión de bentonita en un lodo de perforación es esencial para que cumpla su función como tal, por lo que será necesario realizar un continuo control del pH. Además, un lodo bentonítico es estable cuando su pH está comprendido entre 7 y 9,5, aproximadamente, precipitando por fuera de este intervalo.

### **3. VISCOSIFICANTES Y CONTROLADORES DE FILTRADO EN LODOS DE PERFORACIÓN**

Durante la década de los 50, los investigadores se enfocaron en probar productos básicos usados en los sistemas de lodos para hallar la mayor efectividad de producir una viscosidad y unas propiedades de control de pérdidas de filtrado deseadas con el fin de establecer la menor cantidad de materias primas para producir el sistema de lodo determinado<sup>9</sup>.

La falta de viscosidad y control de filtrado frecuentemente hace necesaria la adición de sólidos comerciales al agua para aumentar la viscosidad, la fuerza de gel y el control sobre la pérdida de fluidos en tal medida que no se altere la tasa de perforación.

#### **3.1 VISCOSIFICANTES**

Son productos agregados a los fluidos para mejorar la habilidad de los mismos de remover los sólidos perforados y suspender el material densificante, durante la perforación de un pozo.

Sin embargo, no todos los viscosificantes potenciales van a brindar una limpieza efectiva y económica del hoyo, y tampoco se hallan totalmente a salvo de las interferencias mecánicas y químicas del medio ambiente.

##### **3.1.1 Rendimiento de viscosificantes.**

El rendimiento de viscosificantes se define como el número de barriles de lodo de 15 cP que se puede obtener de la adición de una tonelada de material seco.

---

<sup>9</sup> Ibid, pág. 20.

La parte crítica de la curva para todos los tipos de viscosificantes aparece a 15 cP de viscosidad. La viscosidad a la que se hace referencia, es la “viscosidad aparente” del lodo, que se obtiene tomando la mitad de la lectura del esfuerzo de corte ( $\tau$ ) a 600 RPM en el viscosímetro de Fann.

Grandes adiciones de arcilla hasta los 15 cP aumentan muy poco la viscosidad, mientras que las pequeñas cantidades tienen un efecto marcado sobre la viscosidad mayor a 15 cP. Esto es cierto no solamente para las arcillas comerciales, sino también para los sólidos de perforación hidratables y materiales viscosificantes.

### 3.1.2 Importancia y aplicación.

Las arcillas tienen muchas aplicaciones en los lodos de perforación. Uno de los más importantes usos es como viscosificante.

El estudio del rendimiento de las arcillas y otros viscosificantes radica en que en el momento de la fabricación del lodo, esto nos proporciona una idea de la cantidad de producto necesario para obtener la viscosidad deseada y con ello podemos optimizar los costos.

### 3.1.3 Calculo del rendimiento de un viscosificante.

$$R = \frac{2000}{\rho_{vis}} + \left( \frac{100 - C^*}{\rho_{H_2O} * C^*} \right) * 2000, \quad \left( \frac{bb \text{ de lodo a } 15 \text{ cP}}{\text{Ton de viscosificante}} \right)$$

$$C^* = \left( \frac{m_{visc}}{m_{vis} + m_{H_2O}} \right) * 100$$

Donde:

$\rho_{VIS}$  = Densidad del viscosificante (lb / bbl)

$\rho_{H_2O}$  = Densidad del agua (lb / bbl)  
 $m_{VIS}$  = Peso del viscosificante (lb)  
 $m_{H_2O}$  = Peso del agua en (lb)  
 $C^*$  = % en peso del viscosificante para alcanzar una viscosidad aparente de 15 cP.

### 3.1.4 Agentes viscosificantes.

Existe gran variedad de agentes viscosificantes, pero a la hora de seleccionar uno en especial para cierto trabajo se deben tener en cuenta ciertas condiciones de trabajo en un sistema de lodo predeterminado, para de esta manera poder seleccionar la mejor opción posible, esto quiere decir que algunos agentes viscosificantes podrían ofrecer un mejor desempeño en una condición determinada que algún otro agente viscosificante comercial<sup>10</sup>.

Las arcillas han sido tradicionalmente los viscosificantes más utilizados en lodos de perforación. Entre ellos sobresalen la bentonita, rica en montmorillonita, de gran capacidad de intercambio catiónico (80 a 150 meq).

Esta capacidad es altamente responsable de la enorme facilidad de hidratación de la bentonita en agua dulce y la atapulguita (silicato hidromagnésico – alumínico) usada para dar viscosidad a lodos de agua salada, donde no es efectiva la bentonita a menos que se halla pre-hidratado en agua dulce.

En la **Tabla 1** se puede observar algunos agentes viscosificantes de uso comercial junto con el papel que desempeñan en un lodo.

---

<sup>10</sup> Ibid, pág. 20.

**Tabla 1.** Agentes viscosificantes comerciales.

<b>AGENTES VISCOSIFICANTES COMERCIALES</b>				
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>M.I</b>	<b>BAROID</b>	<b>BH INTED</b>	<b>ACCIÓN PRINCIPAL</b>
Bentonita de Wyoming API	M_I GEL	Aquagel	Milgel	Viscosidad y control de filtración.
Bentonita de Wyoming API no tratada	M_I GEL SUPREME	Aquagel Cold Seal	Milgel NT	Viscosidad y control de filtración.
Bentonita mezclada de alto rendimiento	KWIK-THIK	Quik-Cel	SUPer-Col	Viscosidad rápida para lodos base agua dulce en la parte superior del pozo.
Atapulguita API	SALT GEL	Zeogel	Salt Water Gel	Viscosidad en lodos a base de agua salada.
Sepiolita API	DUROGEL	Sea-Mud	–	Viscosidad para lodos geotérmicos a base de agua dulce, agua salada y alta temperatura.
Floculante total orgánico	FLOXIT	Barafloc	–	Floculante para sedimentar los sólidos durante la perforación en aguas claras.
Extendedor de bentonita/ Floculante selectivo	GELEX	X-Tend II	Benex	Para extender el rendimiento de la bentonita en lodos de bajo contenido de sólidos y como floculante selectivo.
Biopolímero de goma xanthan de alto peso molecular	DUO-VIS	Barazan	Xanplex D	Goma xanthan producida por bacterias para viscosidad y suspensión en todos los lodos base agua.
Biopolímero de goma xanthan clarificada de primera calidad	FLO-VIS PLUS	–	–	Goma xanthan producida por bacterias para viscosidad y suspensión en los sistemas de fluido de perforación de yacimiento.
Biopolímero de goma welan	Biozan	Biozan	Biozan	Goma welan producida por bacterias para viscosidad y suspensión en lodos de base agua de alto contenido de calcio o baja salinidad.
Goma guar	LO-LOSS	–	New-Vis	Viscosidad y control de filtrado en lodos de bajo contenido de sólidos.
Hidroxietilcelulosa	HEC	Baravis	W.O. 21	Viscosidad en fluidos y lodos base agua de rehabilitación / completamiento.

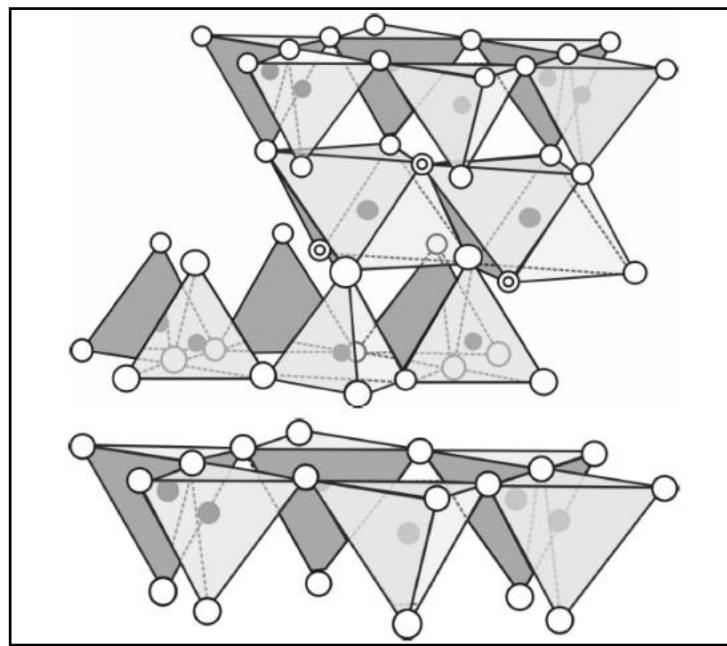
**Fuente.** Manual de fluidos de perforación. Procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. Instituto Americano del Petróleo, Dallas, Texas.

### **Bentonita (Montmorillonita de Sodio):**

Principalmente compuesta por montmorillonita de sodio original de Wyoming o del sur de Dakota, Estados Unidos de América. Esta clase de arcilla puede ofrecer un muy buen aumento de la viscosidad del fluido y control de pérdidas de fluido para lodos base agua debido a la alta tasa de absorción de agua que presentan sus gránulos. Su estructura puede observarse en la **Figura 1**.

También puede ofrecer cierto funcionamiento para lodos base aceite o lodos con presencia de sal si y solo si esta bentonita ha sido de alguna forma modificada o pre-hidratada.

**Figura 1.** Estructura de la bentonita.



**Fuente.** Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Fluidos de perforación. PDVSA. 2002.

### **Bentonita mejorada:**

Este producto es la bentonita de Wyoming tratada con un polímero, por lo general un poliacrilato. El resultado es un producto que produce suspensiones de aproximadamente el doble de la viscosidad de la bentonita de Wyoming.

El mismo comportamiento se puede lograr a un menor costo por tratamiento de una suspensión de bentonita con un polímero floculante o cal. Es eficaz en cualquier entorno en el que el polímero es ineficaz como por ejemplo: agua salada, contaminación por calcio, y altas temperaturas<sup>11</sup>.

### **Atapulgita (Silicato hidro magnesio-aluminio):**

Es un mineral de arcilla natural, se puede clasificar como un viscosificante para lodos salados, a diferencia de la bentonita no permite el control de filtrado y la viscosidad que agrega al fluido no depende de la capacidad de hidratarse sino de la desintegración de su estructura cristalina la cual se convierte en pequeñas partículas con forma de agujas que ofrecen cierta resistencia al flujo.

### **Asbesto (Silicato de calcio-Magnesio):**

Viscosificante tanto para lodos salados como para lodos base agua fresca. Su adición de viscosidad se remite a la resistencia al flujo causada por sus partículas abrasivas que otorgan un bono a favor de la limpieza de la cara del pozo.

Posee una desventaja al ser considerado un material cancerígeno, por lo tanto debe ser manejado con absoluto cuidado para preservar la integridad física de los operadores de campo.

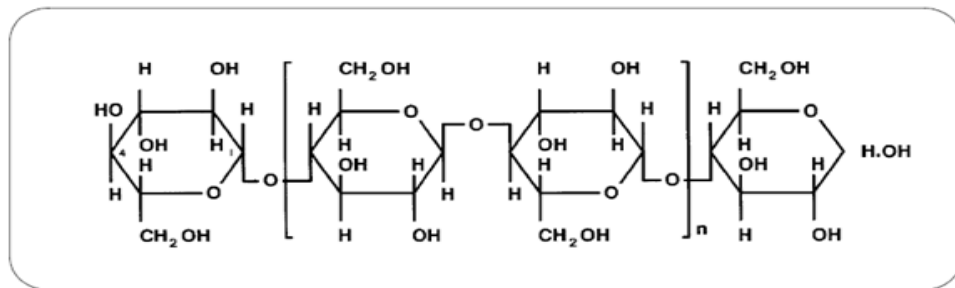
---

<sup>11</sup> SMITH, Martin V. y ANNIS, Max R. Tecnología de fluidos de perforación. 1974.

## Polímeros:

- ❖ **Celulosa polianionica:** Se usa principalmente como controlador de filtrado, pero también puede funcionar como agente viscosificante en lodos salados y base agua, funciona hasta temperaturas cercanas a los 280°F y no hay necesidad de utilizar algún tipo de control bacterial. La estructura de la celulosa puede observarse en la **Figura 2**.

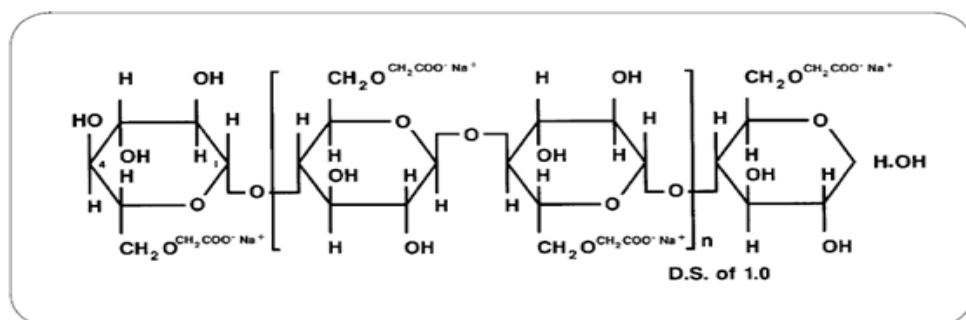
**Figura 2.** Estructura molecular de la celulosa.



**Fuente.** Drilling Fluids Manual, Amoco Production Company.

- ❖ **Carboximetilcelulosa (CMC):** Es un coloide que se crea mediante la adición de una cadena carboximetil a una espina celulósica, como se observa en la **Figura 3**. Este proceso cambia el status de no solubilidad de la celulosa en agua, a un status de solubilidad en agua de la CMC.

**Figura 3.** Estructura molecular de la carboximetilcelulosa.



**Fuente.** Drilling Fluids Manual, Amoco Production Company.

El grado de viscosidad del material está determinado por el número de cadenas adicionales y el peso molecular del producto final. Estos polímeros no son susceptibles a ataques bacterianos, pero no funcionan demasiado bien en ambientes salinos. Se comportan bien en lodos con pH mayor de 7. Pierden su efectividad cuando la concentración de sal es mayor de 50000 ppm y se degrada a temperaturas mayores de 250 °F.

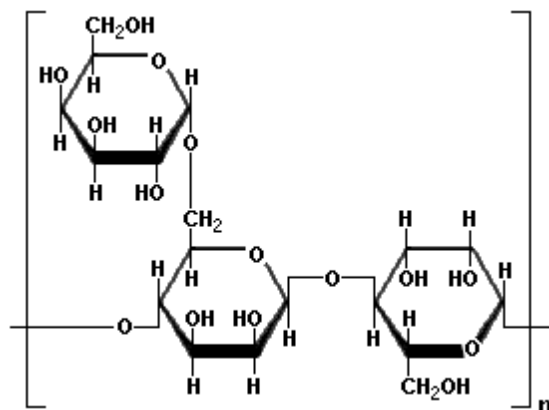
- ❖ **Celulosa carboximetil de sodio:** Posee acción doble, es controlador de filtrado y viscosificante. Esta propiedad de viscosificante puede ser ajustada de acuerdo al grado de polimerización usado para aumentar el peso molecular de este, no necesita protección anti-bacterial y puede funcionar hasta los 250°F.
- ❖ **Goma Guar:** Es un polisacárido de alto peso molecular no aniónico, derivado de la semilla de la planta Guar. Este es un polímero de origen natural no iónico utilizado como viscosificador en aguas que van desde frescas a saturadas de sal, también evita la pérdida de filtrado por la formación de torta.

La goma guar estable es afectada por cambios en el pH y forma una floculación insoluble en contacto con el alcohol isopropílico. Tiene una estabilidad térmica alrededor de 200 °F.

El termino polisacárido se refiere a los polímeros que están compuestos principalmente de moléculas de azúcar mezcladas entre sí. La goma Guar se puede usar en casi cualquier tipo de agua. Su uso más común es en los fluidos de fracturamiento como fluido de sostén, esta goma es susceptible a la degradación bacteriana y requiere algún tipo de preservativo cuando se usa.

Su estructura molecular puede observarse en la **Figura 4**.

**Figura 4.** Estructura molecular de la goma guar.



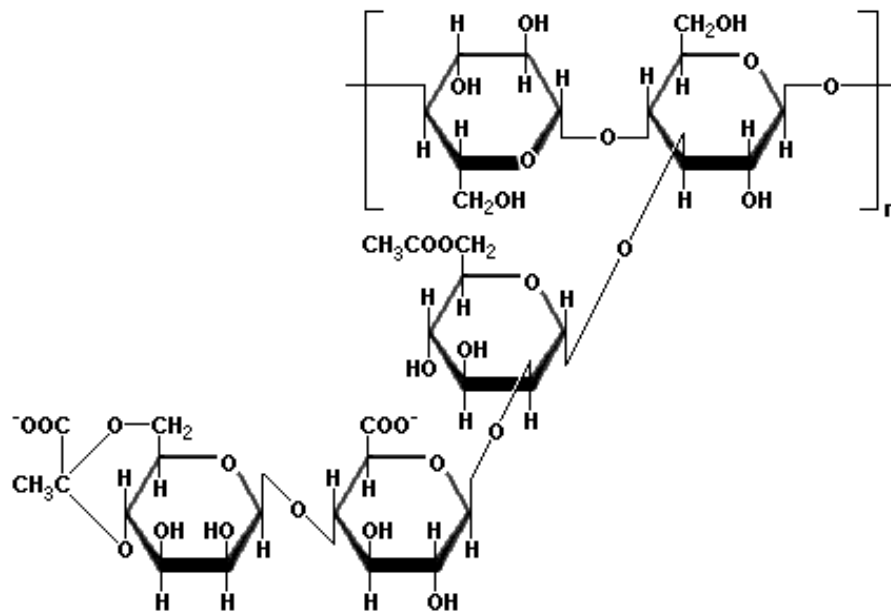
Fuente. [www.scientificpsychic.com](http://www.scientificpsychic.com).

- ❖ **Goma Xanthan:** Es un biopolisacarido de alto peso molecular producido por crecimiento bacteriano. Cada individuo bacteriano produce un revestimiento compuesto de este polímero. Es usado por la bacteria como un mecanismo protector para prevenir la deshidratación.

El polímero es producido comercialmente mediante el crecimiento de bacterias en un proceso de fermentación, precipitando la goma en alcohol, y luego secando y moliendo el producto hasta obtener una presentación en polvo.

La goma Xanthan puede ser usada en casi cualquier tipo de agua, es usado para proveer viscosidad tanto en ambientes de alta salinidad como en ambientes de baja salinidad, además de la viscosidad también puede proveer óptimas propiedades reológicas tales como fuerzas de gel o como valores de cedencia. Solo puede ser utilizado hasta temperaturas de 200 °F. Es muy útil como agente viscosificante y agente de suspensión, es resistente al ataque bacteriano. Su estructura puede observarse en la **Figura 5**.

**Figura 5.** Estructura molecular de la goma xanthan.



Fuente. [www.scientificpsychic.com](http://www.scientificpsychic.com).

- ❖ **Mezcla entre goma guar y goma xanthan:** Usualmente se ofrece una mezcla de igual proporción como viscosificante y controlador de filtrado tanto para ambientes salinos como para ambientes no salinos, se necesita control anti-bacterial y una temperatura de operación menor a los 250 °F.
- ❖ **Poliacrilamidas:** Es un material netamente sintético fabricado mediante la unión de monómeros bajo condiciones apropiadas de presión y temperatura. Las poliacrilamidas pueden ser hechas de acuerdo a las especificaciones del cliente.

El peso molecular y el grado de hidrólisis determinan la viscosidad del polímero en soluciones acuosas. Estos polímeros son principalmente usados como controladores de viscosidad, inyección en recobro mejorado y la estabilización de shales.

- ❖ **Poliacrilatos / Derivados anhídrido maleicos:** Son materiales netamente sintéticos y pueden ser fabricados de acuerdo a un amplio peso molecular con varias cargas en sus moléculas. Existen muchos tipos de poliacrilatos hechos por medio de la combinación de varios monómeros acrílicos ácidos. El tipo y el número de monómeros determinan las propiedades del producto final.

Los poliacrilatos se usan como floculantes, extensores de las propiedades de la bentonita y algunas veces como aditivos estabilizadores de shales. Los copolímeros anhídrido maleico combinados con estireno o etileno son similares a los acrilatos y pueden ser usados principalmente como extendedores de las propiedades de la bentonita.

### **3.2 CONTROL DE FILTRADO**

Las propiedades de la filtración no entran en efecto sino hasta que se forma una torta de lodo, esta se compone de sólidos presentes en el lodo junto con los sólidos adjuntos provenientes de la formación recientemente perforada. Un parámetro aun más importante es el tamaño de partícula, la forma y la manera de su distribución.

La torta o cake es una costra resistente e impermeable que proporciona sostenimiento a las paredes de la formación y que no sea fácilmente erosionable por el roce de la sarta o columna de perforación, dificultando el paso del lodo hacia los acuíferos.

La capacidad de construir el “cake o torta” de un lodo depende del agua libre de éste, así como de la permeabilidad de las paredes del sondeo. Se analiza elasticidad (Plástica, Elástica, Quebradiza), consistencia (Consistente, Inconsistente) y espesor (1/32 – 2/32 de pulgada).

Para que la filtración pueda ocurrir, tres condiciones son necesarias:

- ❖ Debe haber un líquido o un fluido líquido / lechada de sólidos.
- ❖ Debe haber un medio permeable.
- ❖ La presión del fluido debe ser más alta que la presión del medio permeable.

### **3.2.1 Importancia y aplicación.**

Durante el proceso de perforación el lodo nos ayuda a controlar las presiones en la formación, por esto normalmente la presión de la columna de lodo se mantiene por encima de la presión de poro. Esta diferencia de presión ocasiona que la fase líquida del lodo invada la formación creando un daño que depende de la cantidad de líquido que invada y de las propiedades de las arcillas de la formación.

Las pruebas de filtración me permiten detectar estas cantidades de líquido que invaden la formación y hacer los correctivos necesarios en el lodo<sup>12</sup>.

Mediante una atención y control apropiados a las pérdidas de filtrado se pueden obtener los siguientes beneficios:

- ❖ Menor riesgo de pega de la tubería.
- ❖ Mayor protección para las formaciones productoras.
- ❖ Mejor interpretación de los perfiles eléctricos.
- ❖ Estabilidad del pozo.

### **3.2.2 Medición de las pérdidas de filtrado.**

En el pozo ocurren dos tipos de filtración:

---

<sup>12</sup> Indagado de: Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Rodríguez Bermúdez, Eliserio.

- ❖ **Estática.** La filtración estática tiene lugar cuando el lodo no está en movimiento. La torta se hace más gruesa con el tiempo; ya que restringe el flujo de filtrado y la tasa o velocidad de filtración disminuye con el tiempo.

El filtrado estático se mide por medio de dos ensayos estándar de la API, uno a baja presión y otro a alta temperatura – alta presión. El ensayo a baja presión se conoce generalmente como Filtrado API, mientras que el segundo se menciona generalmente como el HT – HP (ensayo a alta temperatura y alta presión).

La diferencia fundamental es que el ensayo API se realiza a 100 psi de presión y temperatura ambiente, mientras que el HT – HP se lleva a cabo a 500 psi de presión y 200 °F de temperatura.

- ❖ **Dinámica.** La filtración dinámica tiene lugar cuando el lodo está circulando o cuando la sarta está en rotación. Los ensayos para la medición de filtrado dinámico se encuentran limitados para los laboratorios y no existe ninguna correlación entre filtrado estático y el dinámico.

La filtración dinámica difiere de la estática en el hecho que el flujo de lodo de la cara del pozo tiende a erosionar la retorta de lodo a medida que esta se forma mediante el proceso de filtración.

La retorta crece hasta que la tasa de depositación sea igual a la tasa de erosión; cuando esta alcanza un espesor de equilibrio la tasa de filtración se vuelve constante. Contrario a esto durante la filtración estática la retorta del lodo nunca deja de crecer y la tasa de filtración disminuye con respecto al tiempo.

Por lo tanto para controlar la cantidad de filtrado perdido hacia la formación, se debe controlar la filtración dinámica y si se quiere prevenir la formación de retortas con demasiado espesor, se debe controlar la filtración estática.

En el proceso de filtración se identifican dos procesos importantes; uno es la parte líquida del lodo que invade la formación y la otra es el revoque (torta o cake) que se forma. Estos dos procesos pueden ocasionar problemas durante la perforación y en la parte productiva del pozo.

### **3.2.3 Problemas relacionados con la invasión excesiva de filtrado.**

- ❖ Daños a la formación causados por la invasión de filtrado y sólidos.
- ❖ Prueba inválida de muestreo del fluido de la formación.
- ❖ Dificultades en la evaluación de la formación causadas por la invasión excesiva de filtrado, la mala transmisión de las propiedades eléctricas a través de revoques gruesos, y posibles problemas mecánicos al bajar y recuperar las herramientas de registro.
- ❖ Las zonas de aceite y gas pueden pasar desapercibidas porque el filtrado está desplazando a los hidrocarburos, alejándolos del pozo, lo cual dificulta su detección.

### **3.2.3 Problemas relacionados con el espesor excesivo de la torta.**

- ❖ Puntos apretados en el pozo que causan un arrastre excesivo.
- ❖ Mayor pistoneo debido a la reducción del espacio anular libre.
- ❖ Pega por presión diferencial de la columna de perforación debido a la mayor superficie de contacto y al desarrollo rápido de las fuerzas de adhesión causada por la tasa de filtración más alta.
- ❖ Dificultades con la cementación primaria debido al desplazamiento inadecuado de la torta.
- ❖ Mayor dificultad para bajar la tubería de revestimiento.

### 3.2.4 Factores que afectan el filtrado.

De acuerdo a los estudios realizados al respecto, los factores que afectan las pérdidas de filtrado son: tiempo, temperatura y presión.

- ❖ **Tiempo.** La velocidad de filtrado (o tasa de filtrado) es directamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, contando desde la pérdida inicial del filtrado.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \sqrt{\frac{t_2}{t_1}}$$

Donde:

- $Q_2$  = Cantidad de filtrado calculada a 30 minutos ( $\text{cm}^3$ )
- $Q_1$  = Cantidad de filtrado a 7.5 minutos ( $\text{cm}^3$ )
- $t_2$  = Duración de la prueba API a 30 minutos
- $t_1$  = Duración de la prueba a 7.5 minutos

La formula anterior se utiliza cuando la pérdida de filtrado es excesiva y se realiza una medición de 7.5 minutos y por la formula se halla a 30 minutos que es el dato que se debe reportar.

- ❖ **Temperatura.** Un aumento en la temperatura eleva la velocidad de filtrado debido a que disminuye la viscosidad de la fase líquida lo cual se convierte en un aumento de la pérdida de fluidos si y solo si los otros factores permanecen constantes. En este caso la cantidad de filtrado variará proporcionalmente con la raíz cuadrada de la viscosidad del fluido.

$$Q_2 = Q_1 \cdot \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}$$

Donde:

$Q_2$  = Cantidad de filtrado desconocida a  $\mu_2$  ( $\text{cm}^3$ )

$Q_1$  = Cantidad de filtrado conocida a  $\mu_1$  ( $\text{cm}^3$ )

- ❖ **Presión.** Los efectos de la presión sobre la velocidad del filtrado dependen de gran medida de las características de la torta. Si la torta es compresible, un aumento en la presión reduce su permeabilidad y disminuye la pérdida de filtrado. Si la torta es incompresible, la velocidad de filtrado varía con la raíz cuadrada de la presión. Una torta incompresible implica que la permeabilidad del mismo no es afectada por la presión.

### 3.2.5 Agentes de control de filtrado.

Existen varios tipos de aditivos esenciales para el control de filtrado en lodos base agua. El éxito que tienen estos aditivos o agentes depende del tipo de lodo al cual están siendo aplicados y al ambiente químico donde se introducen. Algunos de ellos son mostrados en la **Tabla 2**.

**Tabla 2.** Agentes comerciales de control de filtrado.

AGENTES COMERCIALES DE CONTROL DE FILTRADO				
DESCRIPCIÓN	M.I	BAROID	BH INTED	ACCIÓN PRINCIPAL
Mezcla de resina líquida	THERMEX	–	–	Reducir el filtrado en sistemas de alta temperatura.
Lignito resinado	RESINEX	Baranex	Filtrex	Control de filtrado a temperaturas elevadas y estabilizador de reología para todos los lodos base agua.
Almidón de maíz pre-gelatinizado	MY-LO-JEL	Impermex	Milstarch	Control de filtrado y estabilizador de reología para los lodos saturados de agua salada, cal y agua dulce.
Polisacárido preservado	POLY-SAL	Dextrid	Perma-Lose HT	Almidón no fermentante para control de filtrado, viscosidad y estabilización de lutitas en lodos a base de agua salada y agua dulce.
Polisacárido modificado	THERMPAC UL	–	Bio-Lose	Control de filtrado con aumento mínimo de la viscosidad.
Carboximetilcelulosa de sodio	CMC	cellex	CMC	Control de filtrado y viscosificador.
Celulosa polianiónica(PAC)	POLYPAC R	PAC R	Mil-Pac	Control de filtrado y viscosificador.
Celulosa polianiónica (PAC) de viscosidad ultra-baja	POLYPAC UL	PAC L	–	Control de filtrado con aumento mínimo de la viscosidad.
PAC de primera calidad	POLYPAC SUPREME R	–	–	Control de filtrado y viscosificador.
PAC de primera calidad de viscosidad ultra- baja	POLYPAC SUPREME UL	–	–	Control de filtrado con aumento mínimo de la viscosidad.
Almidón derivado	FLO-TROL	–	–	Control de filtrado y viscosificador para sistemas de fluido de perforación de yacimiento.
Copolímero de poliácido de sodio	SP-101	Poly AC	New-Trol	Filtrado a temperaturas elevadas y estabilizador de reología para lodos de bajo contenido de calcio, bajo contenido de sólidos o no dispersos.

**Fuente.** Manual de fluidos de perforación. Procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. Instituto Americano del Petróleo, Dallas, Texas. 2001.

## **Arcillas:**

Son los principales agentes de control de filtrado para sistemas de lodo base agua. Uno de los puntos claves se basa en una correcta distribución del tamaño de partículas solidas. Esto quiere decir que el lodo debe tener un amplio rango de tamaños de partículas, un muy grande porcentaje de estas partículas deben ser iguales o menores a 1 micrón.

Las tres arcillas más usadas como aditivos de lodo son: atapulgita, sepiolita y bentonita de sodio. Las dos primeras son generalmente usadas como viscosificantes en sistemas de lodos de alta salinidad pero no tienen propiedades para el control de filtrado.

La bentonita de calidad API es el mejor producto que se puede usar en la formulación de un lodo con buenas propiedades de revoque y control de filtración.

La bentonita no solamente proporciona el control de filtración, sino también aumenta la viscosidad; por lo tanto, en las aplicaciones de lodo densificado y de altas temperaturas, la concentración de bentonita debería limitarse al rango de 7,5 a 15 lb / bbl.

Los fluidos no densificados usan frecuentemente una concentración de bentonita de 15 a 30 lb / bbl, según la composición química del agua de preparación y la viscosidad deseada. Cualquier concentración superior a 7,5 lb / bbl proporcionará una buena base para el revoque y las características de filtración.

Las arcillas comerciales como la bentonita no solo desarrollan un impacto positivo sobre la viscosidad del lodo sino que también tienen la habilidad de disminuir la pérdida de fluidos<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Ibíd., pág. 20.

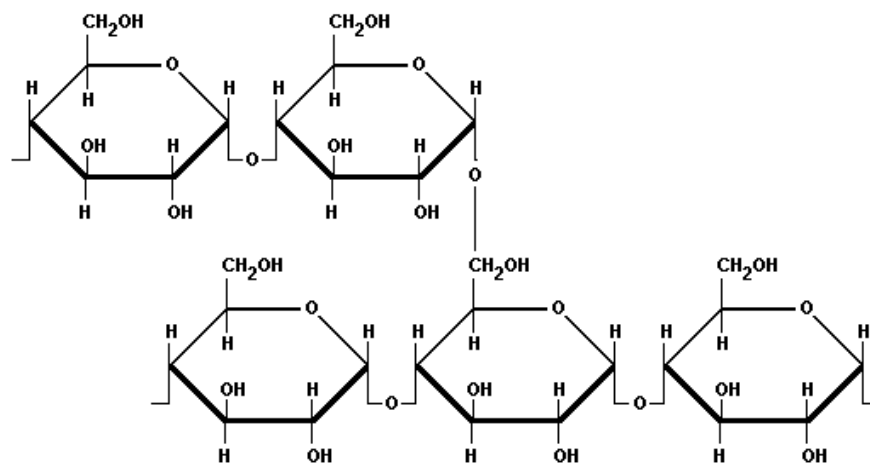
La habilidad de la bentonita para reducir la cantidad de filtrado puede ser atribuida a:

- ❖ Tamaño de las partículas.
- ❖ La forma plana de las partículas.
- ❖ La capacidad de hidratarse además de comprimirse bajo presión.

### Almidones:

Fueron introducidos en la industria petrolera en la década de los 30 como controladores de filtrado, y aun siguen cumpliendo esa misma función. Inicialmente se usó el almidón de maíz, pero últimamente el uso del almidón de papa se ha incrementado dramáticamente. Ambos almidones deben ser procesados con el fin de hacerlos solubles en agua fría. Los almidones son térmicamente estables alrededor de los 250 °F. Los almidones no son resistentes a las bacterias y requieren de un biocida para retardar la fermentación. Su estructura puede observarse en la **Figura 6**.

**Figura 6.** Estructura de la molécula de almidón.



**Fuente.** <http://www.cienciastella.com/Glucidos.html>.

Si los coloides minerales no surten suficiente efecto sobre la disminución de la cantidad del filtrado, la opción más lógica son los coloides orgánicos tales como los almidones. En lodos base agua, la adición de almidones no solo disminuye la cantidad de fluido perdido sino que también estabiliza el lodo, debido a que al entrar en contacto con el lodo se hincha y gelatiniza aumentando el contenido coloidal del lodo.

Las partículas de almidón se expanden en el agua como bolsas esponjosas que se introducen como cuñas en las aberturas de la torta con lo que producen un control de la pérdida de filtrado.

La pérdida de agua libre en el sistema repercute de tal forma que se disminuye la cantidad de filtrado, además los gránulos de amilosa llenos de agua se ajustan a las aberturas presentes en las retortas ayudando aun más a la reducción de la pérdida de fluidos. Su temperatura de operación se limita a rangos menores de 200 °F.

### **Polímeros:**

Son los productos de control de filtración más usados en los lodos base agua. Pueden variar de almidones naturales y celulosa modificada a polímeros sintéticos complicados, capaces de proporcionar el control de filtración a temperaturas elevadas y en condiciones adversas. Estos polímeros a veces se clasifican según su acción dentro de un sistema de lodo, así como también según su composición química.

Debido a los recientes avances en tecnología de fluidos de perforación, el uso de polímeros solubles en agua ha desarrollado sistemas de lodos con una pérdida de fluidos bastante reducida. Los tipos de polímeros se clasifican por su acción sobre un sistema de lodo, esta clasificación se basa en su capacidad de adsorción sobre los sólidos o por su capacidad de viscosificar el fluido.

Comúnmente se usan los polímeros que viscosifican el fluido ya que tienen doble efecto sobre el lodo de perforación, además estos fluidos relativamente sin carga, son menos sensitivos al ambiente en el que se encuentran, también desarrollaran viscosidad en presencia de dureza y sal, sin embargo altas concentraciones podrían reducir su efectividad.

Los polímeros envuelven a las partículas solidas en el lodo, creando una película que se comporta en forma similar a un sellador a presión. También en algunos casos, las largas cadenas se pueden introducir en aberturas de la torta, taponándolas en forma de cuña.

- ❖ **Carboximetil celulosa de sodio (CMC):** CMC es un coloide orgánico utilizado para el control de la filtración. Este material está disponible en varios grados, cada uno varía en las cualidades de control de la viscosidad y la filtración. Los tres grados son comúnmente llamados de alta, media y baja viscosidad de CMC .La elección de la CMC depende de las propiedades deseadas para el fluido de perforación. Cuando el aumento de la viscosidad y el control de filtración son deseados, un grado alto o medio de CMC debería ser utilizado.
- ❖ **Polianiónica celulosa (PAC):** Materiales de carbón activado en polvo son agentes orgánicos de control de filtración similar a la CMC, pero por lo general de mayor pureza y calidad. Este material puede ser utilizado tanto en ambientes de agua dulce como agua salada.
- ❖ **Poliacrilatos de sodio (SPA):** Los SPA son polímeros que están disponibles en varios rangos de peso molecular y ofrecen estabilidad a alta temperatura. Los SPA de bajo peso molecular son defloculantes de arcillas y se utilizan para mejorar el control de la pérdida de líquidos por ese mecanismo. Los SPA de muy alto peso molecular son efectivas para el control de la pérdida de líquidos. Son sensibles a los iones de calcio, especialmente en el alto peso molecular.

## **Dispersantes químicos:**

Una dispersión mejorada generalmente resulta en un decrecimiento en la cantidad de filtrado. Esto es un resultado de la distribución homogénea de los tamaños de las partículas sólidas presentes en el fluido. La habilidad de los dispersantes para reducir la pérdida de fluido se remite a la adsorción química de las partículas o a que el químico por si mismo puede adicionar otro tamaño de partícula.

Estos dispersantes pueden trabajar a temperaturas y a presiones aun mayores que en las que los polímeros pueden trabajar, no son tan fácilmente afectados por la acción bacteriana y pueden ser usados en altas concentraciones de sal y calcio.

## **3.3 POLIMEROS**

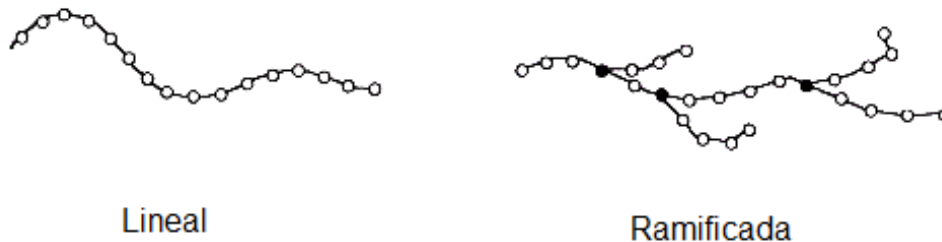
### **3.3.1 Introducción química.**

Un polímero es una molécula grande compuesta de moléculas relativamente pequeñas llamadas monómeros unidos entre sí. El peso molecular de los polímeros va desde unos pocos miles a varios millones de unidades de peso molecular. Los polímeros pueden tener miles de unidades de repetición. Los monómeros pueden ser iguales o diferentes. En el primer caso se obtiene un homopolímero, y en el segundo un copolímero. Las cadenas pueden ser lineales o ramificadas<sup>14</sup>, como se observa en la **Figura 7**.

---

<sup>14</sup> Tomado de Amoco – Drilling Fluids Manual.

**Figura 7.** Tipos de cadenas en un polímero.



**Fuente.** <http://envases.elenaibarreche.com/index.php>.

Los polímeros se adicionan al sistema para aumentar la viscosidad mediante la floculación o por medio de la viscosificación del agua. El uso más común es como controlador de filtrado, usualmente como un aditivo suplementario a la bentonita o a otros químicos.

### **3.3.2 Clasificación de los polímeros.**

Los polímeros constituyen por lo general, sistemas no dispersos y se clasifican de acuerdo a su origen, estructura y utilidad. Cada tipo de polímero tiene sus propias características en términos de cómo funciona en un determinado tipo de fluido de perforación. Por lo tanto, la selección del tipo correcto de polímero es fundamental para un buen rendimiento.

#### **Clasificación de acuerdo a su origen:**

Los polímeros pueden ser: naturales, modificados o sintéticos.

- ❖ **Polímeros naturales:** Se originan de una forma natural y no requieren de cambios químicos en el proceso de manufactura. Son relativamente económicos y generalmente son hidrocoloides, es decir, polímeros que no se solubilizan, sino que se hidratan desarrollando viscosidad. Son usados principalmente para controlar filtrado en sistemas salinos.

- ❖ **Polímeros modificados:** Estos polímeros son alterados químicamente con el fin de mejorar su tolerancia a la sal, su solubilidad y su estabilidad térmica. Poseen buenas propiedades tixotrópicas y de adelgazamiento, pero carecen de propiedades reológicas. Se utilizan principalmente para viscosificar salmueras, por no poseer cargas eléctricas.
- ❖ **Polímeros sintéticos:** Estos polímeros se obtienen, mediante una reacción repetitiva de monómeros iguales (homopolímeros) o diferentes (copolímeros). Son más costosos que los naturales y los modificados, son más resistentes a los contaminantes. Por lo general estos polímeros son de alto peso molecular, razón por la cual se utilizan frecuentemente para: viscosificar, flocular y estabilizar.

#### **Clasificación según su estructura:**

Los polímeros se clasifican según su estructura química y física.

- ❖ **Química:** Existen dos grupos, los que se derivan de las celulosas y los que se derivan de los alcoholes.
- ❖ **Física:** Los polímeros pueden ser iónicos o no iónicos.

Los iónicos son los que poseen cargas eléctricas. Estos polímeros desarrollan viscosidad por ionización y no por solubilización, es decir, se ionizan en el agua.

Los polímeros no iónicos no poseen cargas eléctricas y al contrario de los iónicos desarrollan viscosidad por solubilización, es decir, son solubles en agua. La solubilidad de estos polímeros es afectada por la fuerza iónica o contenido electrolítico del medio. Estos polímeros se utilizan frecuentemente para viscosificar fluidos de completamiento o reparación a base de salmuera.

### Clasificación según su utilidad:

Los polímeros cumplen su función de acuerdo a su peso molecular. Ver **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Clasificación de polímeros.

Peso molecular	Función
Alto	Viscosificantes, floculantes y estabilizantes.
Medio	Reductores de filtrado.
Bajo	Adelgazantes o defloculantes.

**Fuente.** Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Fluidos de perforación. PDVSA. 2002.

### 3.3.3 Factores que afectan a los polímeros.

Entre los principales factores que afectan las propiedades y la estabilidad de los polímeros se pueden destacar mostradas en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Factores que afectan los polímeros.

Factores	Efectos
Concentración y distribución de grupos funcionales ionizables.	Mayor estabilidad: debido a la mayor concentración y distribución de grupos funcionales.
Concentración del polímero.	Menor viscosidad: debido a la poca cantidad de agua disponible para la alta concentración de polímeros existentes.
Sales de solución.	Deshidratación: la sal deshidrata a los polímeros con cargas eléctricas (iónicos), pero no afecta a los que no tienen cargas (no iónicos).
pH de la solución.	Disminución de la viscosidad: debido a la repulsión electrostática causada por el incremento de las cargas negativas, cuando se aumenta el pH por encima de 9,5.

**Fuente.** Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Fluidos de perforación. PDVSA. 2002.

### 3.3.4 Degradación de los polímeros.

Los polímeros sufren degradaciones que afectan considerablemente su viscosidad, como se muestra en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Tipos de degradaciones en los polímeros.

Tipos	Degradación
Termal	Los polímeros son cadenas altamente ramificadas, poseen más sitio para el ataque termal y se degradan con mayor facilidad que los de cadenas lineales.
Mecánica	Los polímeros con cadenas lineales sufren degradación mecánica durante el proceso de mezcla y cuando pasan a través de las boquillas de la mecha o través de los equipos de control de sólidos.
Bacteriana	Los polímeros particularmente los naturales, como el almidón son muy susceptibles al ataque de bacterias. Estos se degradan totalmente en un par de días, sino son tratados con un bactericida.
Oxigeno	La combinación de oxígeno con altas temperaturas degrada en forma rápida a los polímeros. Es necesario el uso de secuestradores de oxígeno para prevenir esta situación.

**Fuente.** Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Fluidos de perforación. PDVSA, 2002.

### 3.3.5 Beneficios de los polímeros líquidos.

Los polímeros normalmente vienen en saco y son agregados a través del embudo lentamente para lograr su mayor efectividad y evitar la formación de flóculos u “ojos de pescado”, sin embargo, en forma líquida estos aditivos ofrecen mayores ventajas como:

- ❖ Pueden ser agregados por cualquier sitio del sistema de circulación, donde exista agitación.

- ❖ Se solubilizan más rápidamente, lo que acorta el tiempo de estabilización del sistema.
- ❖ Son más efectivos a corto tiempo.
- ❖ Hay menos pérdida por almacenamiento y manejo del producto.
- ❖ Se mezclan con mayor facilidad y no es imprescindible disponer de un obrero en forma permanente, para mezclarlos.
- ❖ No se forman “ojos de pescado” y por consiguiente, se minimiza la posibilidad de taponar la formación.

## 4. GENERALIDADES DEL ALMIDON DE YUCA

El uso de los almidones de yuca puede ofrecer un buen comportamiento para ser utilizados en lodos de perforación, esto con el fin de crear un equilibrio entre la disminución de costos e impacto ambiental. Por eso es necesario realizar un análisis acerca de su composición, propiedades y proceso de modificación.

### 4.1 LA YUCA<sup>15</sup>

**Hábitat.** Originaria de América del Sur en la zona tropical y su origen se remonta a la época pre-colombina. Fue encontrada en territorio que hoy pertenece a Brasil y Colombia. Extendida por todas las regiones tropicales y subtropicales de América, Asia y África. Se adapta muy bien a los terrenos pobres y secos.

**Descripción.** Arbusto de la familia de las Euforbiáceas con tallos leñosos, erguidos y nudosos, de hasta 2 metros de altura. La raíz es tuberosa, blanca, de hasta un metro de larga y 20 cm de diámetro.

La yuca como cultivo tiene una tradición remota, los indígenas la utilizaron antes de la conquista de América. La usaban para consumo como raíces frescas, y procesadas para hacer harina ("fariña"), casabe, masato o chicha de yuca, la que sirve de alimento y también después del cuarto día de fermentación, como bebida alcohólica.

---

<sup>15</sup> MEJIA DE TAFUR, María Sara. La yuca en el tercer milenio. Fisiología de la yuca. Capítulo 3.

**Propiedades e indicaciones:** La raíz contiene hasta un 40% de hidratos de carbono (almidón sobre todo), pero es muy pobre en proteínas y en lípidos (grasas). De ahí que su valor nutritivo sea limitado, y por eso la yuca no debe constituir la base del régimen alimentario. Es digestiva, emoliente (suavizante y anti-inflamatoria) y algo astringente.

#### 4.1.1 Características.

En la **Figura 8**, se observa el producto en su forma natural y su clasificación es mostrada en la **Tabla 6**.

**Figura 8.** Yuca.



**Fuente.** <http://ijardineros.blogspot.com>.

**Tabla 6.** Taxonomía de la yuca.

TAXONOMIA	
División	Phanerogamas
Subdivisión	Angiospermas
Clase	Dicotiledónea
Subclase	Archichlamydeae
Orden	Euphorbiales
Familia	Euphorbiaceae
Tribu	Manihoteae
Género	Manihot
Especie	Manihot esculenta Crantz

**Fuente.** Modificado de: Fisiología de la yuca. La yuca en el tercer milenio. MEJÍA DE TAFUR, María Sara.

### 4.1.2 Morfología.

La planta de yuca es un arbusto de tamaño variable de 1 a 5 m de altura; dependiendo del cultivar a las condiciones ecológicas. Los cultivares se agrupan según su tamaño en bajos (hasta 1.50 m), intermedios (1.5 a 2.5 m) y altos (más de 2.50 m).

Es una de las especies más eficientes en cuanto a la producción de almidón, pues obtiene rendimientos de 80 Toneladas por hectárea por año bajo condiciones experimentales, siendo su potencial similar al de la caña de azúcar, el maíz, el sorgo y el arroz. Ahora bien bajo condiciones sub-óptimas, su potencial de rendimiento sobresale cuando se le compara con otros cultivos; por eso se dice que esta especie tiene la habilidad de producir donde otros cultivos no crecerían.

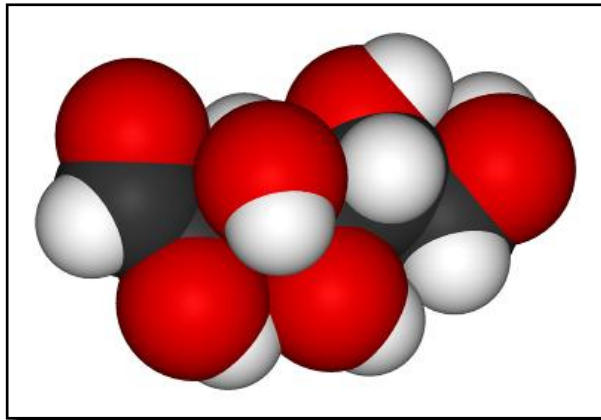
## 4.2 ALMIDÓN

El almidón está compuesto fundamentalmente por glucosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) (ver **Figura 9**). Es una sustancia que se obtiene exclusivamente de los vegetales (usados como reserva alimenticia)<sup>16</sup> que lo sintetizan a partir del dióxido de carbono que toman de la atmósfera y del agua que toman del suelo. En el proceso se absorbe la energía del sol y se almacena en forma de glucosa y uniones entre estas moléculas para formar las largas cadenas del almidón, que pueden llegar a tener hasta 2000 o 3000 unidades de glucosa.

---

<sup>16</sup> <http://www.wikipedia.org/wiki/Almidón>

**Figura 9.** Modelo tridimensional de la glucosa.



**Fuente.** <http://eltamiz.com>.

El almidón se diferencia de todos los demás carbohidratos en que, en la naturaleza se presenta como complejas partículas discretas (gránulos). Los gránulos de almidón son relativamente densos, insolubles y se hidratan muy mal en agua fría. Pueden dar suspensiones cuando se dispersan en agua, suspensiones que pueden variar en sus propiedades en función de su origen, dando lugar a la formación de suspensiones de baja viscosidad que pueden ser fácilmente mezcladas y bombeadas, incluso a concentraciones mayores del 35%.

Los almidones comerciales se obtienen de las semillas de cereales, particularmente de maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum spp.*), varios tipos de arroz (*Oryza sativa*), y de algunas raíces y tubérculos, particularmente de patata (*Solanum tuberosum*), batata (*Ipomoea batatas*) y mandioca (*Manihot esculenta*).

Tanto los almidones como los almidones modificados tienen un número enorme de posibles aplicaciones, en las que cabe destacar<sup>1718</sup>:

<sup>17</sup> <http://www.monografias.com/trabajos43/almidones.html>

<sup>18</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Almidón>

- ❖ Adhesivo
- ❖ Ligante
- ❖ Enturbiante
- ❖ Formador de películas
- ❖ Estabilizante de espumas
- ❖ Agente anti-envejecimiento de pan
- ❖ Gelificante
- ❖ Glaseante
- ❖ Aglutinante
- ❖ Humectante
- ❖ Estabilizante
- ❖ Texturizante
- ❖ Espesante.

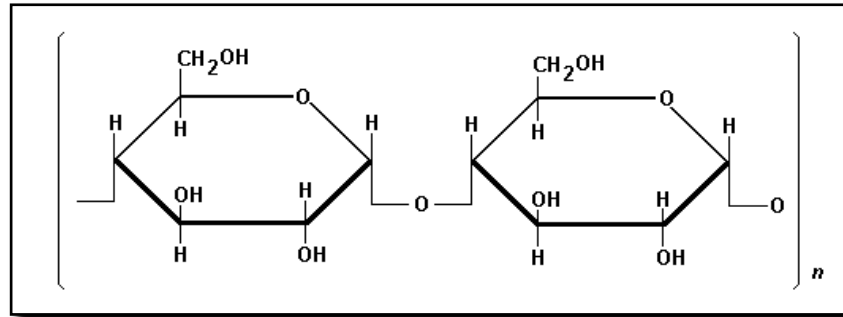
Los almidones se encuentran principalmente constituidos por amilosa y amilopectina, que solo se diferencian en su estructura, y contienen regiones cristalinas y no cristalinas en capas alternadas<sup>19</sup>.

La amilosa es un polímero no ramificado de unos 100 a 1000 residuos de D-glucosa unidos por enlace glucosídicos a (1-4) (igual que el enlace de la maltosa) (ver **Figura 10**). No es soluble en agua, pero forma agregados hidratados en solución acuosa y puede adoptar una estructura helicoidal (ver **Figura 11**), en la que cada vuelta de hélice consta de 6 moléculas de glucosa. El interior de la hélice contiene sólo átomos de hidrógeno, y es por tanto lipofílico, mientras que los grupos hidroxilo están situados en el exterior de la hélice.

---

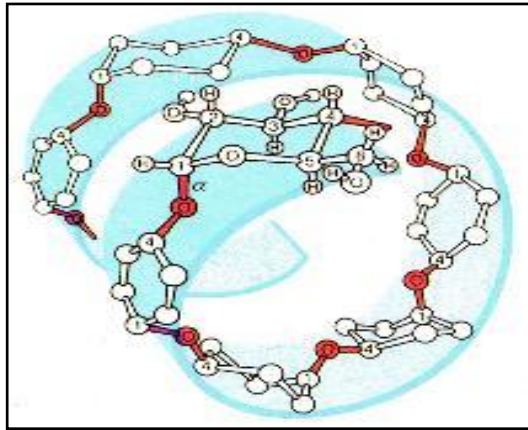
<sup>19</sup> <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>

**Figura 10.** Estructura química de la amilosa<sup>20</sup>.



**Fuente.** <http://www.bvsde.ops-oms.org>.

**Figura 11.** Estructura helicoidal de la amilosa<sup>21</sup>.



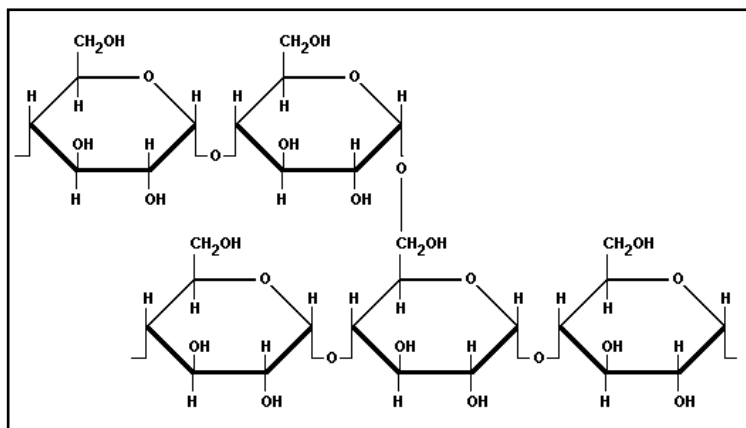
**Fuente.** <http://www.bvsde.ops-oms.org>.

La amilopectina se diferencia de la amilosa en que contiene ramificaciones que le dan una forma molecular a la de un árbol (ver **Figura 12** y **Figura 13**); las ramas están unidas al tronco central (semejante a la amilosa) por enlaces  $\alpha$ -D-(1,6), localizadas cada 15-25 unidades lineales de glucosa. Su peso molecular es muy alto ya que algunas fracciones llegan a alcanzar hasta 200 millones de daltones.

<sup>20</sup> [www.cepis.ops-oms.org/impacto](http://www.cepis.ops-oms.org/impacto).

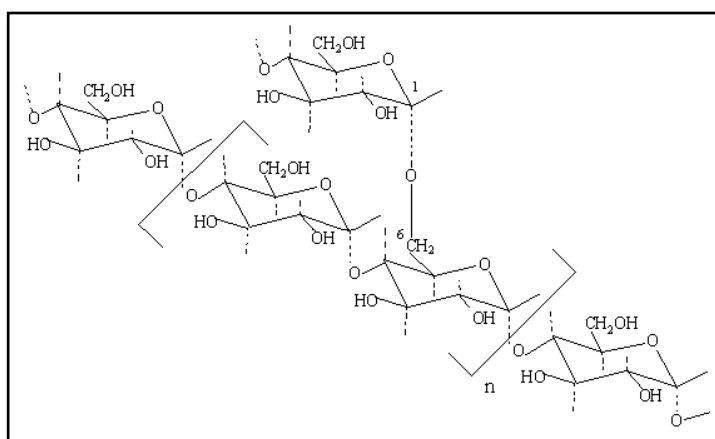
<sup>21</sup> [www.bolivar.udo.edu.ve/amilosa2d.jpg](http://www.bolivar.udo.edu.ve/amilosa2d.jpg)

**Figura 12.** Estructura química de la amilopectina<sup>22</sup>.



Fuente. <http://www.bvsde.ops-oms.org>.

**Figura 13.** Estructura de árbol de la amilopectina.



Fuente. <http://www.monografias.com>.

Las propiedades tecnológicas, industriales y físico-químicas del almidón dependen mucho del origen, peso molecular específico y de la relación amilosa / amilopectina (ver **Tabla 7**), tanto cuando forma parte de un material complejo (harina) como cuando se utiliza purificado, lo cual es muy frecuente<sup>23</sup>.

<sup>22</sup> [www.cepis.ops-oms.org/impacto](http://www.cepis.ops-oms.org/impacto)

<sup>23</sup> <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/azucares/almidon.html>

**Tabla 7.** Relación amilosa / amilopectina según la procedencia del almidón<sup>24</sup>.

ALMIDON	CONTENIDO DE AMILOSA	CONTENIDO DE AMILOPECTINA
Arroz	19 %	81 %
Avena	16 %	84 %
Bellota	24 %	76 %
Cebada	22 %	78 %
Cebada waxy	0 %	100 %
Maíz	28 %	72 %
Manzana	19 %	81 %
Papa	20 %	80 %
Plátano	16 %	84 %
Tapioca	16 %	84 %
Trigo	26 %	74 %

**Fuente.** Modificado de: [www.cepis.ops-oms.org/impacto](http://www.cepis.ops-oms.org/impacto) y ALVIS, Armando, VÉLEZ, Carlos A., VILLADA, Héctor S. y RADA MENDOZA, Maite. Análisis físico-químico y morfológico de almidones. Disponible en: [www.scielo.cl/pdf/infotec](http://www.scielo.cl/pdf/infotec).

El almidón de yuca también se conoce como Tapioca y es utilizado en la industria alimentaria como ligante de agua, coadyuvante de emulsificantes, fuente de carbohidratos, espesante y agente texturizante. Es un polvo fino de color blanco, con aproximadamente un 13% de humedad como máximo y un pH cercano a 6. En la **Tabla 8** se muestran algunas propiedades generales del almidón de yuca.

<sup>24</sup> [www.cepis.ops-oms.org/impacto](http://www.cepis.ops-oms.org/impacto)

**Tabla 8.** Propiedades generales del almidón de yuca.

<b>PROPIEDADES GENERALES DEL ALMIDÓN DE YUCA</b>	
<b>PROPIEDAD</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>
Tamaño de granulo (eje mayor, $\mu\text{m}$ )	4 – 35
Amilosa (%)	17 – 20
Amilopectina (%)	80 – 83
Temperatura de gelatinización ( $^{\circ}\text{C}$ )	52 – 65
Viscosidad relativa	Alta
Tendencia a gelificar / Retrogradar	Media
Aspecto de la pasta	Clara
Sabor	Insípido
Calor de combustión (KJ / g)	17,6

**Fuente.** SANCHEZ LOPEZ, Alberto. Obtención de jarabes de glucosa por hidrólisis enzimática de almidón extraída de tres variedades de yuca. Tesis de Pregrado, Escuela de Química. Universidad Industrial de Santander, 2002.

El almidón natural necesita de la aplicación de calor para que se hidrate. El grado de hidratación depende del pH, temperatura y tiempo. Cuando se hidrata y se dispersa en agua caliente se forma un compuesto de color claro que tiene un sabor suave; cuando se enfría puede formar un gel débil. Si se calienta por tiempo prolongado y en condiciones ácidas, el almidón pierde sus habilidades espesantes.

### **4.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA**

La extracción de almidón puede realizarse en plantas artesanales con capacidad de unas pocas toneladas al mes y en enormes plantas con capacidades hasta de 400.000 toneladas por año.

El proceso de extracción de almidón de yuca consiste en una serie de operaciones que por vía húmeda, logra la extracción del almidón que contienen las raíces de la yuca obteniendo almidón fresco (dulce) o agrio.

El proceso es el siguiente<sup>25</sup>:

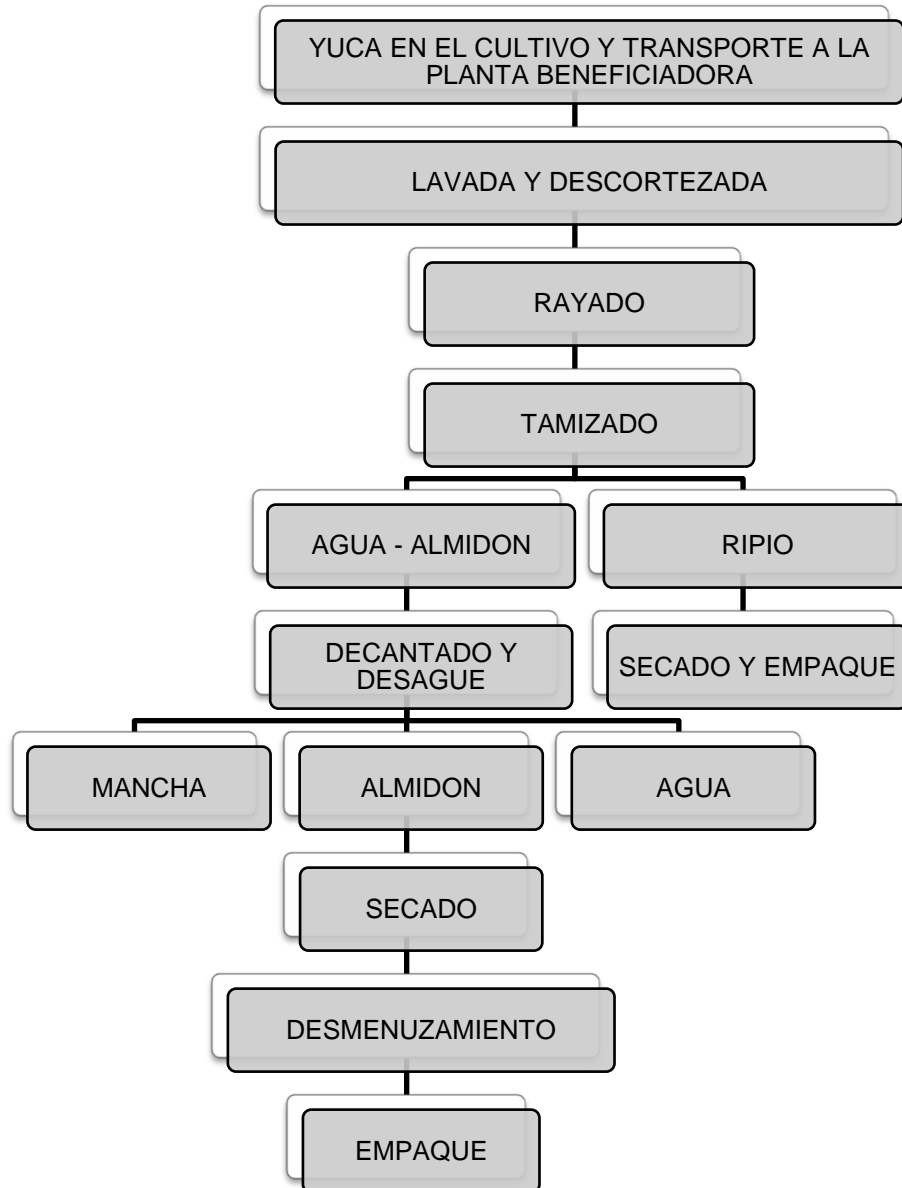
- ❖ Recepción de yuca y almacenamiento.
- ❖ **Lavado y pelado:** Eliminación de tierra, impurezas y cascarilla.
- ❖ **Selección y despunte:** Operación manual que permite retirar las raíces en mal estado y las puntas de la yuca que contiene fibras y pueden afectar la calidad del almidón.
- ❖ **Rallado:** Se desagregan las raíces para romper las paredes celulares y dejar libre los gránulos de almidón, convirtiendo las raíces en una masa conocida como “pulpa o masa rallada”.
- ❖ **Colado:** El almidón es separado de la pulpa en un tambor giratorio con agua; el producto obtenido es una suspensión denominada “lechada”.
- ❖ **Tamizado:** Se retiran las fibras remanentes en la lechada.
- ❖ **Sedimentación:** Separación del almidón de la “lechada” mediante canales o tanques obteniendo almidón dulce o fresco.
- ❖ **Secado:** Mediante exposición al sol para eliminar el exceso de agua.
- ❖ Triturado, empaque y almacenamiento del producto final.

En la **Figura 14** se muestra el proceso general para la extracción de almidón de yuca.

---

<sup>25</sup> PEREZ VIDAL, Andrea, TORRES LOZADA, Patricia y SILVA LEAL, Jorge. Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Optimización de variables ambientales y operacionales. 2009.

**Figura 14.** Diagrama del proceso general de extracción de almidón de yuca.



**Fuente.** Modificado de: <http://taninos.tripod.com/yuca.htm>.

#### **4.4 PROCESO DE TRANSFORMACION DEL ALMIDON**

El proceso de la transformación del almidón consiste en una técnica denominada Hidrólisis, que consiste en el rompimiento de las cadenas que conforman el almidón con el fin de permitir el paso de moléculas de agua y cambiar la tendencia del almidón para ser soluble en agua fría, ya que este parámetro es un factor importante en los lodos de perforación.

La hidrólisis del almidón se puede hacer por dos vías: ácida o enzimática.

- ❖ **Hidrólisis ácida:** Es una técnica empleada para el rompimiento de la cadena de almidón usando ácidos, pero esta tiene muchas desventajas, en las que destacan: formación de productos no deseables y flexibilidad muy pobre (el producto final sólo se puede modificar cambiando el grado de hidrólisis), por último es necesario que el equipo resista el ácido y las temperaturas requeridas durante el proceso.
- ❖ **Hidrólisis enzimática:** Esta técnica consiste en el rompimiento de la cadena de almidón usando enzimas en un proceso denominado “Licuefacción Enzimática” con el fin de permitir el paso de moléculas de agua (ver **Figura 15**). Esta técnica ha desplazado a la hidrólisis ácida debido a que dispone de nuevas enzimas, además de presentar ventajas como: control de formación de productos no deseables y mayor flexibilidad del producto.

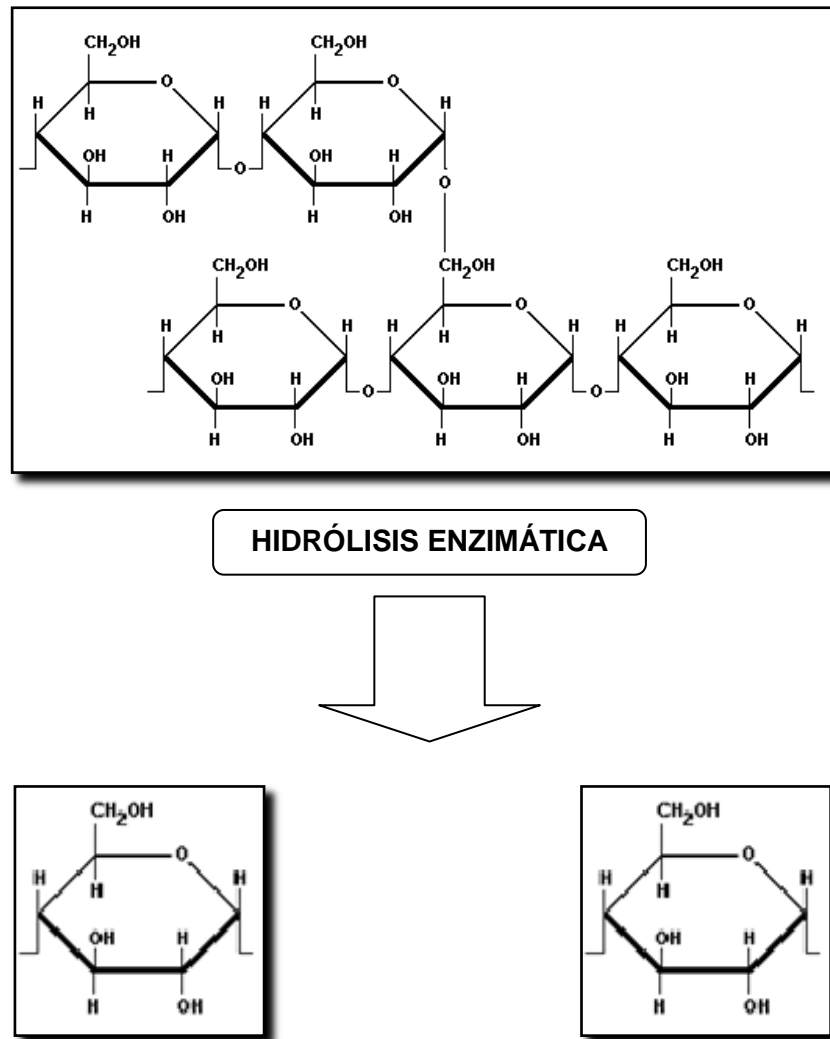
El diseño para la licuefacción es uno de los procesos más importantes. Hay diversas maneras para realizar licuefacciones eficientes, entre las que destacan<sup>26</sup>:

- ❖ Estufas a chorro a alta temperatura (120 – 150 °C) sin adición de enzimas.
- ❖ Jets a baja temperatura (105 °C) con dosis divididas de enzimas.
- ❖ Sistemas que rara vez van más de 85 °C.
- ❖ Tanques de mezclas que están tanto por encima como por debajo del punto de gelatinización.

---

<sup>26</sup> Indagado de Using Enzymes in Ethanol Production. Novozymes.

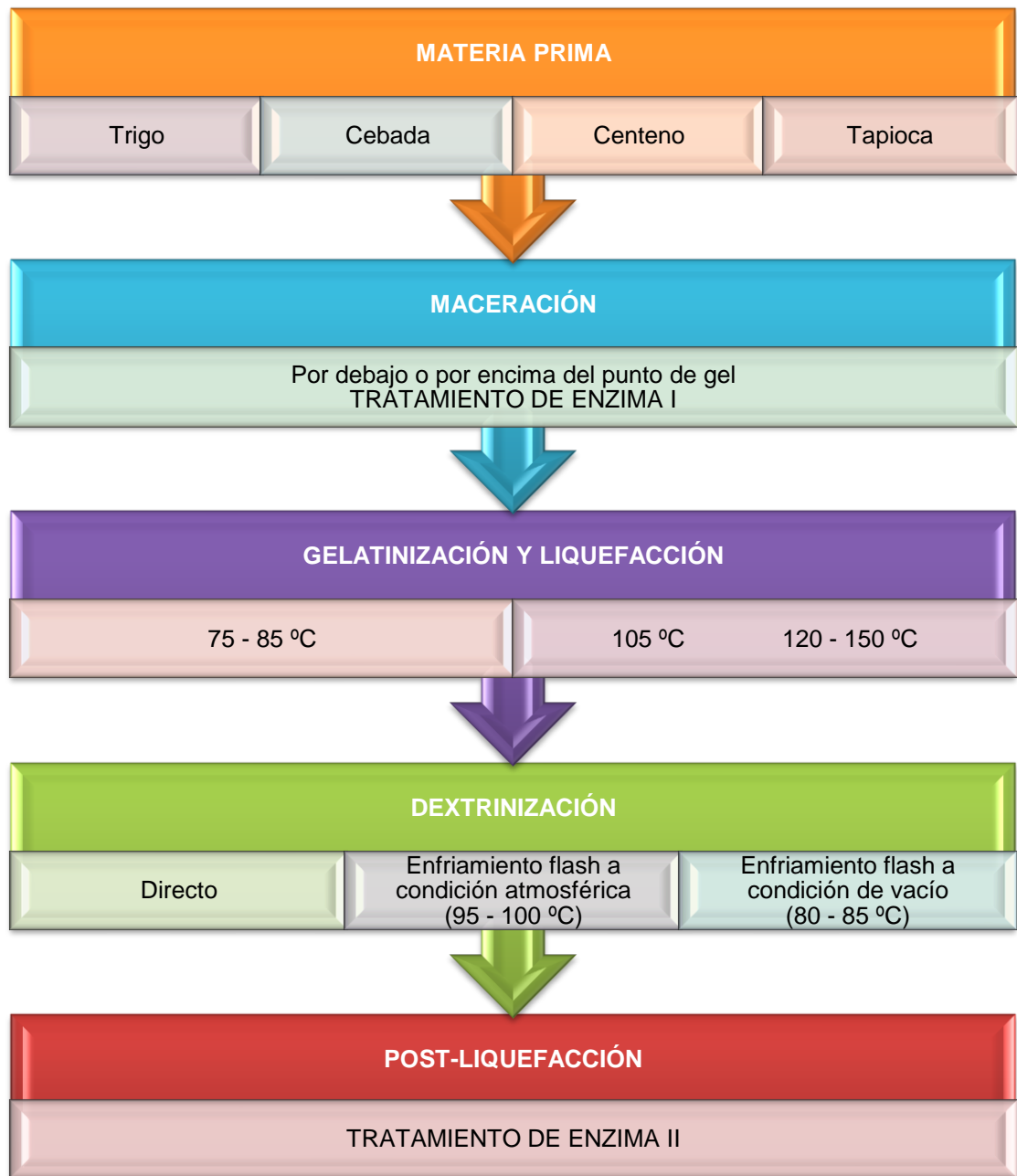
**Figura 15.** Proceso de hidrólisis enzimática.



**Fuente.** Los autores. Indagado de Using Enzymes in Ethanol Production. Novozymes.

Cada uno es diseñado con un propósito dado tal como reducción de energía, reducción de agua, maximización de la producción, retención de nutrientes, etc. Actualmente la licuefacción comprende de 2 o 3 etapas, llamadas: maceración, gelatinización y dextrinización (ver **Figura 16**).

**Figura 16.** Principio del proceso de hidrólisis de los cereales distintos del maíz.



**Fuente.** Modificado de Using Enzymes in Ethanol Production. Novozymes.

- ❖ **Maceración:** Es el proceso de mezclar grano molido u otros carbohidratos fermentables en agua. Esta técnica va desde las mezclas iniciales de la materia prima en agua hasta antes de la cocción y sacarificación con el fin de romper los granos de almidón en azúcares.

- ❖ **Gelatinización:** Es la cocción de las materias primas amiláceas. La gelatinización es la etapa en la que los gránulos de almidón absorben agua y pierden su estructura cristalina individual para convertirse en un gel líquido y viscoso. La gelatinización es importante ya que es el proceso preliminar que resulta necesario para hacer al almidón susceptible a la hidrólisis enzimática para la conversión de azúcares fermentables.
  
- ❖ **Dextrinización:** Técnica en el cual el almidón es sometido a calor seco con el objetivo de descomponerse y formar dextrinas, que son de color marrón y son solubles en agua.

#### **4.5 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA**

El almidón de yuca tiene amplia gama de aplicaciones en la industria de alimentos, de papel y cartón, textil, farmacéutica y de adhesivos, entre otros. Sin embargo, la mayoría de los almidones usados en estos sectores son modificados, los cuales han sido desarrollados para reducir una o más de las limitaciones que tiene el almidón nativo para uso industrial.

Las modificaciones en el almidón involucran el tratamiento del gránulo por medios físicos, químicos y bioquímicos que causan la ruptura de algunas o todas las moléculas, lo cual permite realzar o inhibir en el almidón propiedades como consistencia, poder aglutinante, estabilidad a cambios en el pH y temperatura, y mejorar su gelificación, dispersión o fluidez.

#### **4.6 PRODUCCIÓN DE YUCA EN COLOMBIA**

La yuca se caracteriza por su gran diversidad de usos. Tanto sus raíces como sus hojas pueden ser consumidas por humanos y animales, de maneras muy

variadas. Además los productos de la yuca también pueden ser utilizados por la industria, principalmente a partir de su almidón.

El mercado de almidón de yuca representa el 4% de la producción mundial de yuca, actividad concentrada básicamente en Asia. En Tailandia, Vietnam y la República Popular de China, la yuca se transforma en almidón en grandes fábricas. En América, la producción de almidones se concentra principalmente en Brasil, Paraguay y Colombia.

En el ámbito de América Latina, según la FAO<sup>27</sup>, Colombia es el tercer productor de yuca más importante después de Brasil y Paraguay. Para 2004, Brasil produjo alrededor de 24 millones de toneladas de yuca, con un rendimiento promedio de 12,6 toneladas por hectárea; Paraguay produjo cerca de 5,5 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 12,8 toneladas por hectárea. Y según la CIAT<sup>28</sup>, Colombia produjo en 1996, 2 millones de toneladas de yuca, cifra que descendió en 1997 a 1,6 millones y continuo descendiendo a 1,5 millones en 1998, debidas a difíciles condiciones climáticas que se presentaron en esos años por los fenómenos del Niño y Niña.

En 1999 la producción empezó a recuperarse gracias a las labores de promoción del cultivo que se realizaron en el país. A partir del año 2000, los usos del cultivo de yuca se han venido diversificando y orientando más hacia el mercado de los productos industriales, como almidones, alimentos balanceados o concentrados para animales y para consumo humano<sup>29</sup>.

La superficie sembrada durante el año 2004 fue de 12.468 hectáreas, de las cuales las mayores áreas se sembraron en Córdoba y Sucre (ver **Tabla 9** y **Figura 17**).

---

<sup>27</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

<sup>28</sup> Centro Internacional de Agricultura Tropical.

<sup>29</sup> Censo de Yuca para uso industrial. Fuente DANE, 2004.

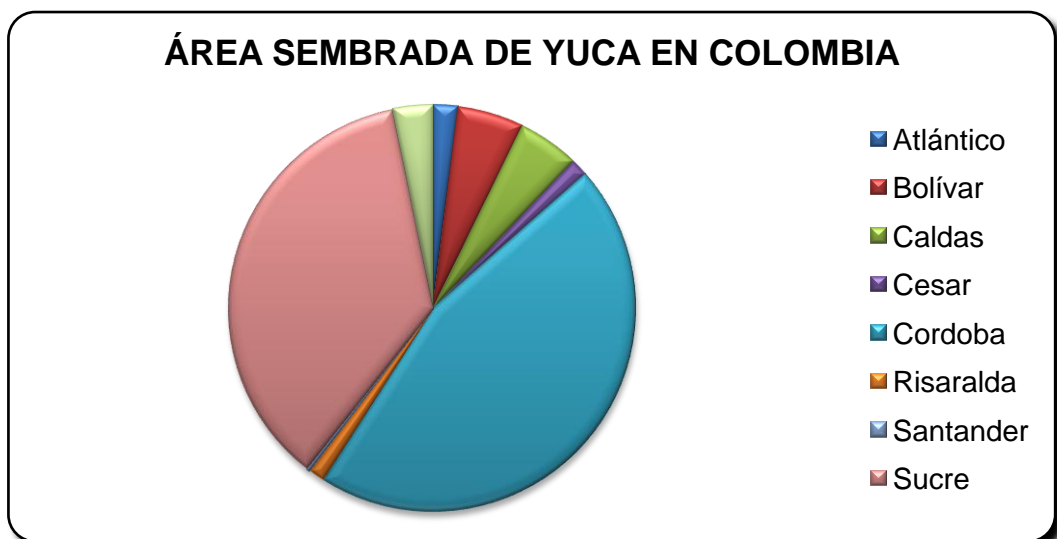
La producción nacional de yuca para uso industrial, en el período de referencia fue de 119.602 toneladas (ver **Tabla 10** y **Figura 18**). Y el destino de la producción de yuca para uso industrial (ver **Tabla 11** y **Figura 19**).

**Tabla 9.** Área sembrada de yuca para uso industrial por departamentos.

Departamento	Superficie sembrada (Hectáreas)	%
Atlántico	245	1,97
Bolívar	655	5,25
Caldas	611	4,90
Cesar	176	1,4
Córdoba	5675	45,52
Risaralda	154	1,24
Santander	38	0,30
Sucre	4516	36,22
Tolima	398	3,20
<b>Nacional</b>	<b>12468</b>	<b>100</b>

Fuente. DANE.

**Figura 17.** Área sembrada de yuca para uso industrial por departamentos.



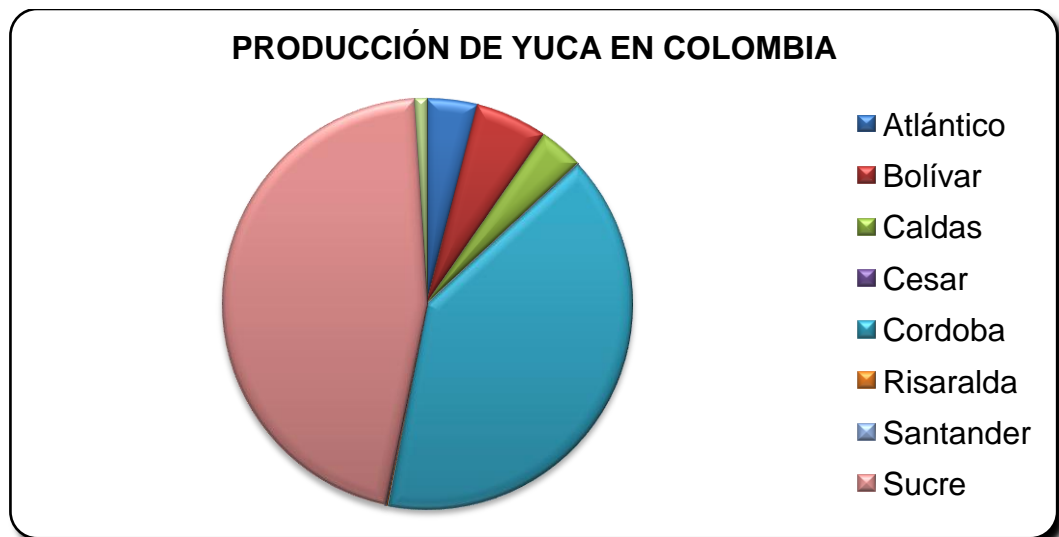
Fuente. Los autores, basados de los datos del DANE.

**Tabla 10.** Producción de yuca para uso industrial por departamentos.

Departamento	Producción (Tonelada)	%
Atlántico	4734,00	3,96
Bolívar	6773,46	5,66
Caldas	4100,71	3,43
Cesar	80,25	0,07
Córdoba	47739,00	39,90
Risaralda	135,00	0,11
Santander	175,58	0,15
Sucre	54724,93	45,76
Tolima	1140,00	0,96
<b>Nacional</b>	<b>119602,93</b>	<b>100</b>

Fuente. DANE.

**Figura 18.** Producción de yuca para uso industrial por departamentos.



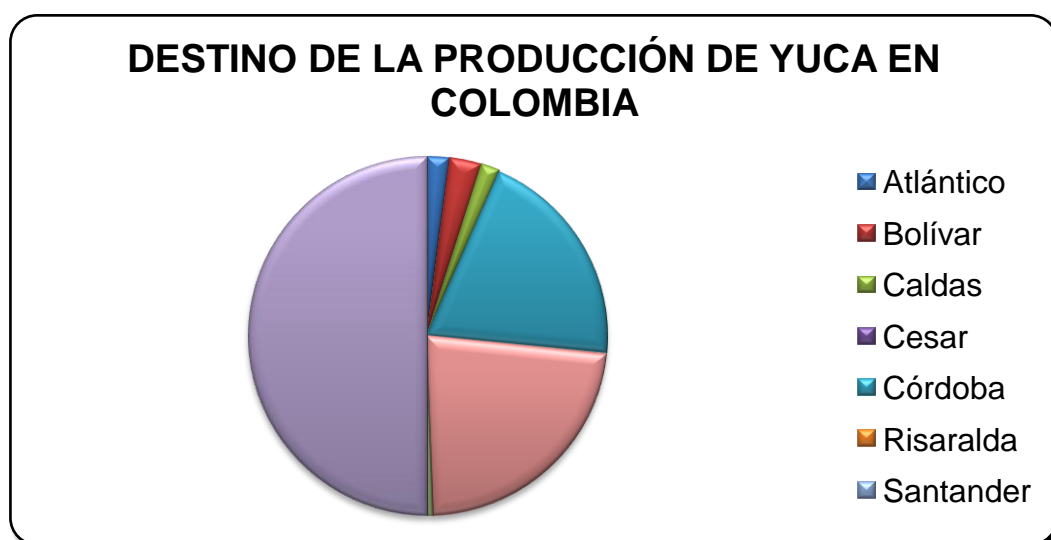
Fuente. Los autores, basados de los datos del DANE.

**Tabla 11.** Destino de la producción de yuca para uso industrial según el volumen producido por departamentos.

Departamento	Destino de la producción			
	Industria	Consumo en fresco	Otro	Total
Atlántico	4652,20	81,80	0,00	4734,00
Bolívar	6011,00	750,51	11,95	6773,46
Caldas	264,72	3835,99	0,00	4100,71
Cesar	80,25	0,00	0,00	80,25
Córdoba	44815,55	2655,55	267,90	47739,00
Risaralda	69,00	66,00	0,00	135,00
Santander	175,58	0,00	0,00	175,58
Sucre	47296,29	7191,99	236,65	54724,93
Tolima	608,80	531,20	0,00	1140,00
<b>Nacional</b>	<b>103973,39</b>	<b>15113,04</b>	<b>516,50</b>	<b>119602,93</b>

Fuente. DANE.

**Figura 19.** Destino de la producción de yuca para uso industrial según el volumen producido por departamentos.



Fuente. Los autores, basados de los datos del DANE.

Según cifras del censo a nivel nacional se encontraron 1.805 productores de yuca para uso industrial, ubicados esencialmente en la región Caribe que representó el 89,74%, siendo los departamentos más representativos Córdoba y Sucre con el 82,60% de los productores.

#### **4.7 ANTECEDENTES EN INVESTIGACIÓN CON ALMIDÓN DE YUCA**

Los lodos son fluidos esenciales dentro el proceso de perforación del pozo, de ello su importancia de obtener productos que cumplan con las características adecuadas y que además den una opción más económica y eficiente dentro del proceso de perforación.

Uno de los propósitos en este proyecto es realizar nuevos estudios enfocados en la implementación de productos biodegradables tales como los almidones, los cuales sean de amplia producción y puedan sustituir las funciones de ciertos productos sintéticos.

Como antecedentes se tienen varios trabajos realizados con las cuales se notó que el almidón de yuca presentaba propiedades y/o características bastante eficientes con relación a otros aditivos. Pero se observó un inconveniente, que los almidones naturales no son solubles en agua fría, necesitan un proceso previo que consiste en la gelatinización del almidón, como fue empleado en el año 2010 durante la realización del trabajo de tesis de pregrado titulado **FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDON DE PLATANO COMO ADITIVO PARA LODOS DE PERFORACION** de los estudiantes de Ingeniería de Petróleos Adrian Camilo Fajardo Molina y Carlos José Rodríguez Rodríguez.

La empresa Promisión S.A. que ha desarrollado diferentes productos utilizando como materia prima almidón de yuca, suministró las muestras de almidones con diferente grado de hidrólisis enzimática para la realización del presente

trabajo relacionado con la factibilidad de su uso como aditivo en fluidos de perforación.

En cuanto a la degradación siempre han existido inconvenientes con todos los diferentes productos biodegradables implementados dentro de las investigaciones realizadas en la Escuela de Ingeniería de Petróleos. A pesar que se han utilizado bactericidas, esto no ha sido suficiente para su conservación ya que duran poco tiempo y empiezan a descomponerse. En cambio los productos usados en esta investigación tienen un periodo bastante amplio de conservación o no sufren degradación temprana.

Además hay artículos científicos presentados ante la SPE, como son: **NEW VISCOSIFIER FOR WATER BASED MUDS BASED ON A GENETICALLY MODIFIED STARCH** y **ROLE OF STARCH IN DESIGNING NONDAMAGING COMPLETION AND DRILLING FLUIDS**, en los cuales se han modificado los almidones físicamente o químicamente lo cual ha traído consigo muy buenos resultados, entonces de aquí se parte para estudiar la posible eficiencia de los productos que serán evaluados dentro de esta investigación, teniendo en cuenta que el almidón de yuca fue modificado enzimáticamente.

## **5. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO ADITIVO EN LODOS DE PERFORACIÓN**

El Diseño de Experimentos tuvo su inicio teórico a partir de 1935 por Sir Ronald A. Fisher<sup>30</sup>, quién sentó la base de la teoría del Diseño Experimental y que a la fecha se encuentra bastante desarrollada y ampliada. Actualmente las aplicaciones son múltiples, especialmente en la investigación de las ciencias naturales, ingeniería, laboratorios y casi todas las ramas de las ciencias sociales.

La experimentación proporciona los datos experimentales, en contraste con los datos de la observación; los datos de la observación se representan como su nombre indica por observaciones de las unidades elementales de una población o de una muestra, y no deben ser cambiados ni modificados por ningún intento de parte de un investigador en el curso de la observación.

El diseño experimental es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés. El diseño experimental prescribe una serie de pautas relativas qué variables hay manipular, de qué manera, cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden para poder establecer con un grado de confianza predefinido la necesidad de una presunta relación de causa-efecto.

---

<sup>30</sup> FISHER, Ronald Aylmer. (1890 –1962) Científico, matemático, estadístico, biólogo evolutivo y genetista inglés.

El propósito de un diseño experimental es proporcionar métodos que permitan obtener la mayor cantidad de información válida acerca de una investigación, teniendo en cuenta el factor costo y el uso adecuado del material disponible mediante métodos que permitan disminuir el error experimental.

Frecuentemente cuando se estudia un grupo de tratamientos, los resultados absolutos varían erráticamente mientras que los resultados relativos permanecen razonablemente estables. En tales situaciones es posible establecer, que en circunstancias similares se espera que ciertos tratamientos sean sustancialmente mejores que otros, aunque los resultados de un solo tratamiento no pueden ser establecidos exactamente. En tales campos de la experimentación, los experimentos tienden a ser comparativos y tienen un interés secundario dado por los resultados absolutos. Brownlee (1957) clasifica estos experimentos como ciencias aplicadas. La teoría estadística del diseño de experimentos se relaciona inicialmente con este tipo de experimentos.<sup>31</sup>

El objetivo de este tipo de experimentos es dar información clara necesaria para tomar decisiones satisfactorias. La principal característica de este tipo de experimentación es que todos los tratamientos de interés están incluidos en el experimento. Consecuentemente, la estructura matemática básica es el modelo de efectos fijo de Eisenhart (1947) ya que bajo experimentos repetidos se seleccionaran los mismos tratamientos. En este caso, es de interés la detección y estimación de relaciones determinadas entre las medias del universo de objetos considerados. Para estos modelos, el interés primordial es probar varias hipótesis relacionadas con las medias de los tratamientos.

El experimento comparativo comienza con un planteamiento exacto del problema a ser resuelto. Esto es, se debe hacer una especificación detallada de los objetivos del experimento con una formulación precisa de la hipótesis a probar. Es insuficiente solamente establecer en forma simple “comparar estos

---

<sup>31</sup> KUEHL, Robert O. Diseño de Experimentos. Editorial Thomson Learning, 2 edición.

tratamientos”. Esta especificación define la población a la cual las conclusiones serán aplicadas, determina los factores, tratamientos y sus niveles, especifica las variables respuesta a ser medidas y establece las diferencias críticas a ser detectadas. Sin estas especificaciones, ningún experimento podrá ser diseñado adecuadamente. Como lo fundamental en la decisión sobre las hipótesis son los experimentos planeados, es necesario que se tenga en cuenta las siguientes características para estos ensayos.

## 5.1 IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE VARIABLES

Los factores que pueden influir en el desarrollo del experimento son mostrados en la **Tabla 12**.

**Tabla 12.** Factores influyentes.

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>
Temperatura	Cuantitativo
pH	Cuantitativo
Tipo de lodo	Cualitativo
Agitación	Cuantitativo
Tipo de almidón	Cualitativo
Concentración del almidón	Cuantitativo
Operadores	Cualitativo

**Fuente:** Los autores.

- ❖ **Temperatura:** A falta de un laboratorio más completo todas las pruebas se dan a temperatura ambiente ( $T_{\text{AMBIENTE}} = 25,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), constante en todas las pruebas.

- ❖ **pH:** El pH de un fluido de perforación que contiene bentonita debe estar generalmente por encima de 8,5 y los aditivos del lodo requieren de una alta alcalinidad para que funcionen a niveles óptimos (pH = 10).
- ❖ **Tipo de lodo:** Se utilizará un lodo base agua (dulce y salado) con igual composición para cada tratamiento con el fin de asegurar condiciones constantes y que los resultados sean comparativos.
- ❖ **Agitación:** Para buenos resultados todas las pruebas se realizarán en un tiempo de agitación de 3 minutos y con el mismo equipo para asegurar condiciones de prueba constantes.
- ❖ **Tipo de almidón:** El almidón a usar en las pruebas es homogéneo y son de diferentes grados de hidrólisis enzimática.
- ❖ **Concentración del almidón:** Se fijarán dependiendo del tipo de prueba a realizar.
- ❖ **Operadores:** Trabajarán los mismos operadores y realizarán labores a la misma hora del día.

En consecuencia, los factores (variables independientes) que se consideran para el experimento son las concentraciones de cada tipo de almidón de yuca (lb / bbl). En la **Tabla 13** se identifican las diferentes variables involucradas en esta investigación.

**Tabla 13.** Identificación y definición de variables.

<b>Variables</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
Independientes	2	Concentración de almidón de yuca, Almidones (G 8060 y MDX 085)
Dependientes	7	Densidad, Va, Vp, Yp, pH, Filtrado API, Cake
Criterio de comparación	7	Arcilla natural, Aquagel, Bentonita, Yeso, Cal, Sal, CaCl <sub>2</sub>

**Fuente.** Los autores.

## **5.2 SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

Debido a que se deben hacer comparaciones en las pruebas entre los productos evaluados y los de uso comercial, se hace necesario la selección de un diseño uni-factorial, con el fin de observar el comportamiento de cada uno de estos productos. Cuando se habla de productos se hace referencia a los almidones de yuca hidrolizados MDX 060 y G 8060.

Los experimentos comparativos son básicamente experimentos en los cuales los tratamientos se comparan por sus efectos medios sobre una variable respuesta con el objetivo principal de determinar cuál de ellos es mejor en algún sentido. El propósito de este tipo de experimento es proveer información necesaria para tomar decisiones satisfactorias.

Teniendo en cuenta que se hará una sola replica debido a la disponibilidad del laboratorio para realizar las pruebas, además que se producirán de manera aleatoria, el diseño que mejor se adapta a estas condiciones es el diseño enunciado inicialmente.

Este modelo es el más sencillo del diseño de experimentos, en el cual la variable de respuesta puede depender de la influencia de un único factor, de forma que el resto de las causas de variación se engloban en el error experimental.

El análisis de varianza a usar será el ANOVA de clasificación simple (una vía), con grupos iguales para diseños balanceados y modelo tipo I, o más comúnmente llamado Efectos Fijos.

El análisis de un experimento está basado normalmente en un modelo matemático para las observaciones, y este está relacionado y justificado con el diseño. Para este caso en particular de un factor y grupos iguales, el modelo matemático tiene la siguiente estructura:

$$y_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$y_{ij}$	=	Valor de respuesta
$i$	=	Número de tratamientos
$j$	=	Número de replicas
$\mu$	=	Es la media general
$T_j$	=	Es el efecto diferencial del tratamiento
$\varepsilon_{ij}$	=	Error experimental aleatorio

Cabe aclarar que los factores son las variables que afectan el diseño experimental, y las distintas categorías de un factor son sus niveles.

En esta investigación se utilizará el software Statgraphics Centurión XV con el objetivo de realizar un análisis estadístico de los datos involucrados.

### **5.2.1 Caracterización del almidón de yuca hidrolizado.**

Se hará la respectiva caracterización de los productos utilizando el laboratorio de lodos y cementos de la universidad industrial de Santander y si es necesario realizar consultas en la literatura.

### 5.2.2 Prueba de Degradación.

Hay dos maneras de degradarse:

- ❖ Por microorganismos: Lo hidrolizan y/o fermentan en alcoholes u otros compuestos. Su tiempo depende de si se contamina con ellos.
- ❖ Por retrogradación: Se pierde solubilidad (en agua). Este se da con un tiempo de a 6 meses.

Para identificar el efecto de los productos al entrar en contacto con el medio y validar el tiempo en el cual, teóricamente no se alteren sus propiedades, se realizarán observaciones con respecto al tiempo en las pruebas de compatibilidad enunciando los cambios que pueden surgir sobre estos por el efecto de los microorganismos o la retrogradación de los productos.

### 5.2.3 Prueba de Compatibilidad.

Antes de realizar las pruebas es necesario observar el comportamiento de cada uno de los aditivos básicos en un lodo base agua, al entrar en contacto o al ser mezclados con el almidón de yuca hidrolizado (G 8060 y MDX 060).

Las muestras de almidón de yuca serán colocadas en un recipiente de vidrio debidamente cerrado y rotulado para hacerles seguimiento periódico y observar los cambios.

Estas pruebas serán llevadas a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Lodos y Cementos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos en la Universidad Industrial de Santander (Sede Principal).

En la **Tabla 14** y **Tabla 15** se describen los formatos generales para cada uno de los productos a ser evaluados.

**Tabla 14.** Formato para la prueba de compatibilidad del almidón de yuca.

Formato de prueba de compatibilidad para almidón de yuca				
No.	Muestra	Cantidad de tipo de almidón de yuca (ml)	Cantidad de otros aditivos (gr)	Fecha
1	Tipo de almidón de yuca	40	0	
2	Tipo de almidón de yuca + Bentonita	40	5	
3	Tipo de almidón de yuca + CaCO <sub>3</sub>	40	5	
4	Tipo de almidón de yuca + SAPP	40	1,5	
5	Tipo de almidón de yuca + NaOH	40	1	

**Fuente.** Los autores.

**Tabla 15.** Formato de observaciones para el almidón de yuca.

Formato de observaciones		
Fecha	pH	Observaciones

**Fuente.** Los autores.

### 5.3 PRUEBA DE RENDIMIENTO

Con esta serie de pruebas de laboratorio se busca conocer el comportamiento de la viscosidad aparente del lodo de acuerdo a la concentración de almidón de yuca como aditivo con dos productos diferentes (G 8060 y MDX 060) en un sistema de agua dulce y en un sistema de agua salada.

Se requiere hacer réplica de las pruebas para comparar la variabilidad de los datos siendo el bloque uno la prueba original y el bloque dos la réplica, esto con el fin de realizar un análisis estadístico de los datos involucrados y obtener un polinomio que represente el comportamiento de la variable de respuesta. Para ello se utilizará el software Statgraphics Centurión XV.

Como no se sabe el rendimiento de los almidones, es posible que el rango para cada uno de los productos llegue a ser diferente. En consecuencia es necesario realizar una prueba preliminar para definir bajo que patrón de adición se va a trabajar para cada producto; luego de definir el grado de adición, este se lleva de manera acumulativa hasta alcanzar una viscosidad aparente de 15 cP. De manera general el formato para reportar los resultados de cada uno de los productos y para su réplica respectiva esta enunciado en la **Tabla 16**.

**Tabla 16.** Formato de la prueba de rendimiento del almidón de yuca en agua dulce.

BLOQUE	PRUEBA DE RENDIMIENTO EN AGUA DULCE					
	PROCEDIMIENTO		600 RPM	Va (cP)	Densidad del lodo (lb / gal)	pH
	PRODUCTO	CONCENTRACION (lb/bbl)				

**Fuente.** Los autores.

#### 5.4 PRUEBA DEL EFECTO DEL PH SOBRE LA VISCOSIDAD

Con este esquema se pretende evaluar el comportamiento del rendimiento de los almidones de yuca con respecto al pH del medio donde se esté evaluando.



**Tabla 18.** Formato de la prueba del efecto de la sal sobre la viscosidad.

BLOQUE	PRUEBA DEL EFECTO DE LA SAL SOBRE LA VISCOSIDAD							
	PROCEDIMIENTO		600 RPM			Va (cP)		
	PRODUCTO	CONCENTRACION	0,04 lpb NaCl	40 lpb NaCl	120 lpb NaCl	0,04 lpb NaCl	40 lpb NaCl	120 lpb NaCl

**Fuente.** Los autores.

Este análisis se hará siempre y cuando los almidones tengan un rendimiento considerable frente a los productos utilizados como viscosificantes. En el caso de que los productos no ofrezcan características requeridas para ser un buen viscosificante, se seleccionará el que ofrezca mejor rendimiento, se evaluará en un sistema salino saturado y se comparará con un sistema salino saturado bentonítico, para cada uno de los sistemas se requiere su respectiva replica, luego se realizará un análisis estadístico para los datos obtenidos para cada sistema.

## 5.6 PRUEBA DE EXTENSIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA BENTONITA

Se busca conocer la eficacia de los almidones de yuca como productos extendedores de las propiedades de la bentonita, en la **Tabla 19** se muestra el formato general planteado para cada concentración de bentonita.

**Tabla 19.** Formato de la prueba de extensión de las propiedades de la bentonita.

BLOQUE	BENTONITA (lb/bbl)	ALMIDÓN	CONCENTRACIÓN (lb/bbl)	600 RPM	Va (cP)
		G 8060	0		
			2,5		
			5		
		MDX 060	0		
			2,5		
			5		

Fuente. Los autores.

## 5.7 PRUEBA DE CONTROLADOR DE FILTRADO

Con esta prueba se busca conocer el funcionamiento del almidón de yuca como controlador de filtrado en presencia de contaminantes que se pueden encontrar durante la perforación de pozos. A continuación se enuncian las formulaciones para el lodo base, su contaminación y su respectivo tratamiento.

### PROCEDIMIENTO PREVIO – LODO BASE

Viscosificante	30 lb / bbl de bentonita de Wyoming
Controlador de filtrado	1,5 lb / bbl de Pac-L
Dispersante	1 lb / bbl de SAPP
Controlador de pH	0,5 lb / bbl de NaOH

## **PROCEDIMIENTO 1 – LODO BASE CONTAMINADO CON SAL (NaCl)**

1 bbl de Lodo Base + 40 lb / bbl de NaCl

### **TRATAMIENTO 1.1 – Tratamiento con Pac-L**

1 bbl de Lodo Base contaminado con sal  
+ 10 % v / v de Agua  
+ 2 lb / bbl de SAPP  
+ 1 lb / bbl de Pac-L  
+ NaOH para justar el pH al lodo base original

### **TRATAMIENTO 1.2 – Tratamiento con almidón de yuca G 8060**

1 bbl de Lodo Base contaminado con sal  
+ 10 % v / v de Agua  
+ 2 lb / bbl de SAPP  
+ 5 lb / bbl de Almidón de Yuca G 8060  
+ NaOH para justar el pH al lodo base original

### **TRATAMIENTO 1.3 – Tratamiento con almidón de yuca MDX 060**

1 bbl de Lodo Base contaminado con sal  
+ 10 % v / v de Agua  
+ 2 lb / bbl de SAPP  
+ 5 lb / bbl de Almidón de Yuca MDX 060  
+ NaOH para justar el pH al lodo base original

## **PROCEDIMIENTO 2 – LODO BASE CONTAMINADO CON CAL**

1 bbl de Lodo Base + 1 lb / bbl de Cal

### **TRATAMIENTO 2.1 – Tratamiento con Pac-L**

Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio

Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio

Ajustar el pH al del Lodo Base original

+ 2 lb / bbl de SAPP

+ 1 lb / bbl de Pac-L

### **TRATAMIENTO 2.2 – Tratamiento con Almidón de Yuca G 8060**

Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio

Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio

Ajustar el pH al del Lodo Base original

+ 2 lb / bbl de SAPP

+ 5 lb / bbl de Almidón de Yuca G 8060

### **TRATAMIENTO 2.3 – Tratamiento con Almidón de Yuca MDX 060**

Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio

Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio

Ajustar el pH al del Lodo Base original

+ 2 lb / bbl de SAPP

+ 5 lb / bbl de Almidón de Yuca MDX 060

## **PROCEDIMIENTO 3 – LODO BASE CONTAMINADO CON YESO**

1 bbl de Lodo Base + 1 lb / bbl de Yeso

### **TRATAMIENTO 3.1 – Tratamiento con Pac-L**

Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio

Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio

Ajustar el pH al del Lodo Base original

- + 2 lb / bbl de SAPP
- + 1 lb / bbl de Pac-L

### **TRATAMIENTO 3.2 – Tratamiento con Almidón de Yuca G 8060**

- Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio
- Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio
- Ajustar el pH al del Lodo Base original
- + 2 lb / bbl de SAPP
- + 5 lb / bbl de Almidón de Yuca G 8060

### **TRATAMIENTO 3.3 – Tratamiento con Almidón de Yuca MDX 060**

- Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio
- Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio
- Ajustar el pH al del Lodo Base original
- + 2 lb / bbl de SAPP
- + 5 lb / bbl de Almidón de Yuca MDX 060

## **PROCEDIMIENTO 4 – LODO CONTAMINADO CON CLORURO DE CALCIO**

1 bbl de Lodo Base + 1 lb / bbl de Cloruro de Calcio

### **TRATAMIENTO 4.1 – Tratamiento con Pac-L**

- Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio
- Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio
- Ajustar el pH al del Lodo Base original
- + 2 lb / bbl de SAPP
- + 1 lb / bbl de Pac-L

#### **TRATAMIENTO 4.2 – Tratamiento con Almidón de Yuca G 8060**

Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio

Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio

Ajustar el pH al del Lodo Base original

+ 2 lb / bbl de SAPP

+ 5 lb / bbl de Almidón de Yuca G 8060

#### **TRATAMIENTO 4.3 – Tratamiento con Almidón de Yuca MDX 060**

Si pH > 9, agregar 0,5 lb / bbl de bicarbonato de sodio

Si pH < 9, agregar 0,5 lb / bbl de carbonato de sodio

Ajustar el pH al del Lodo Base original

+ 2 lb / bbl de SAPP

+ 5 lb / bbl de Almidón de Yuca MDX 060

Además es necesario identificar el volumen de filtrado con respecto al tiempo, para ello se realizarán lecturas a diferentes tiempos.

Para las pruebas del lodo base, los formatos son mostrados en las **Tabla 20** y **Tabla 21**. Los formatos a utilizar en las diferentes pruebas para controlador de filtrado son descritos en las **Tabla 22** y **Tabla 23**.

### 5.7.1 Pruebas para el lodo base.

**Tabla 20.** Formato de las propiedades del lodo base.

LODO BASE			
600 RPM		pH	
300 RPM		Fuerza de Gel	
V <sub>p</sub> (cP)		Densidad del lodo (lb / bbl)	
Y <sub>p</sub> (lb / 100 ft <sup>2</sup> )		Filtrado API (ml) @ 30 min	
V <sub>a</sub> (cP)		Espesor (1 / 32 pulgada)	

Fuente. Los autores.

**Tabla 21.** Formato de pérdidas de filtrado con el tiempo para el lodo base.

LODO BASE	
5 min	
10 min	
15 min	
20 min	
25 min	
30 min	

Fuente. Los autores.

**Tabla 22.** Formato de la prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado.

BLOQUE	PRUEBA DEL ALMIDON DE YUCA COMO CONTROLADOR DE FILTRADO											
	PROCEDIMIENTO		600 RPM	300 RPM	Vp (cP)	Yp (lb / 100 ft <sup>2</sup> )	Va (cP)	pH	Fuerza de gel	Densidad del lodo (lb / bbl)	Filtrado API (ml) @ 30 min	Espesor (1/32 pulgada)
	PASOS	TRATAMIENTO										
	1	Base + 40 lpb Sal										
	1.1	1 lpb Pac - L										
	1.2	5 lpb Almidón G 8060										
	1.3	5 lpb Almidón MDX 060										
	2	Base + 1 lpb Cal										
	2.1	1 lpb Pac - L										
	2.2	5 lpb Almidón G 8060										
	2.3	5 lpb Almidón MDX 060										
	3	Base + 1 lpb Yeso										
	3.1	1 lpb Pac - L										
	3.2	5 lpb Almidón G 8060										
	3.3	5 lpb Almidón MDX 060										
	4	Base + 1 lpb CaCl <sub>2</sub>										
	4.1	1 lpb Pac - L										
	4.2	5 lpb Almidón G 8060										
	4.3	5 lpb Almidón MDX 060										

Fuente. Los autores.

**Tabla 23.** Formato de la prueba de extensión de filtrado.

BLOQUE	PRUEBA DE EXTENSIÓN DE FILTRADO							
	PROCEDIMIENTO		FILTRADO (ml)					
	PASOS	TRATAMIENTO	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
	1	Base + 40 lpb Sal						
	1.1	1 lpb Pac - L						
	1.2	5 lpb Almidón G 8060						
	1.3	5 lpb Almidón MDX 060						
	2	Base + 1 lpb Cal						
	2.1	1 lpb Pac - L						
	2.2	5 lpb Almidón G 8060						
	2.3	5 lpb Almidón MDX 060						
	3	Base + 1 lpb Yeso						
	3.1	1 lpb Pac - L						
	3.2	5 lpb Almidón G 8060						
	3.3	5 lpb Almidón MDX 060						
	4	Base + 1 lpb CaCl <sub>2</sub>						
	4.1	1 lpb Pac - L						
	4.2	5 lpb Almidón G 8060						
	4.4	5 lpb Almidón MDX 060						

**Fuente.** Los autores.

## 6. DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

### 6.1 CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA

Los gránulos de almidón están compuestos por capas externas de amilopectina y capas internas de amilosa, cuya proporción es variable dependiendo de la fuente del almidón.

Su composición química es la de un polisacárido formado únicamente por unidades glucosídicas, es decir, es una macromolécula formada por gran cantidad de moléculas de glucosa que se repiten.

En el caso del almidón de yuca, su tamaño puede variar de 5  $\mu\text{m}$  a 35  $\mu\text{m}$ , su forma es entre redonda y achatada y su contenido de amilosa es alrededor del 16%.

Para la realización de las pruebas, la empresa Promisión S.A., productor de almidones, suministró dos tipos de productos, modificados por hidrólisis enzimática, con los cuales se realizaron las pruebas de laboratorio.

Cada producto tiene características diferentes entre las cuales podemos destacar las mostradas en la **Tabla 24**.

**Tabla 24.** Características de los almidones de yuca.

	Almidón de yuca MDX 060	Almidón de yuca G8060
<b>Color</b>	Kaki	Miel
<b>Estado Físico</b>	Líquido viscoso	Líquido ligero
<b>Densidad (gr/ml)</b>	1,36	1,52
<b>Contenido de agua (%)</b>	70	82
<b>pH</b>	6,55	4,60

**Fuente.** Los autores.

Estas propiedades fueron observadas y determinadas tan pronto se adquirieron los productos, en el Laboratorio de Lodos y Cementos de la Universidad Industrial de Santander.

En la **Figura 20**, se puede observar los productos suministrados para esta investigación.

**Figura 20.** Almidones de yuca hidrolizados.



## 6.2 PRUEBA DE DEGRADACIÓN

Los productos en su etapa inicial no tuvieron contacto directo con el medio, ya que estuvieron cerrados herméticamente y no se destaparon hasta el inicio de las pruebas, para evitar la contaminación de microorganismos por utensilios de laboratorio o por el ambiente del mismo.

Según referencias del proveedor los productos a condiciones de presión y temperatura normales sufren degradación en un tiempo entre 4 y 6 meses. Luego de este periodo existe la alta posibilidad de que el producto entre en un proceso de degradación, esto por efecto de los factores enunciados en el diseño experimental.

En la **Figura 21** se observa los dos productos a utilizar en la prueba de degradación y en la **Tabla 25** y **Tabla 26**, se muestra el seguimiento realizado a cada uno de los productos para observar la acción de los microorganismos o la retrogradación del producto a condiciones de presión y temperatura de laboratorio.

**Figura 21.** Almidón de yuca G 8060 y MDX 060 para observación de degradación.



**Tabla 25.** Formato de observación del almidón de yuca G 8060.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca G 8060</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	4,60	Fluido viscoso de color miel, presenta formación de burbujas en la superficie además de solo observar una sola fase.
Marzo 18 del 2011	4,20	El fluido aún se comportaba de igual manera a la lectura anterior.
Marzo 22 del 2011	4,40	Se mantiene igual.
Marzo 24 del 2011	4,40	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	4,38	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	4,20	Se mantiene igual, sin burbujas e inodoro.
Abril 6 del 2011	4,47	Se mantiene igual.

**Tabla 26.** Formato de observación del almidón de yuca MDX 060.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca MDX 060</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	6,55	Fluido acuoso de color blanco, consistente, de una sola fase sin formación de burbujas ni grumos.
Marzo 18 del 2011	5,18	El fluido se mantiene igual.
Marzo 22 del 2011	3,18	Se mantiene igual.
Marzo 24 del 2011	3,09	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	2,73	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	2,69	Se mantiene igual, con un olor un poco fuerte.
Abril 6 del 2011	2,71	Presenta inicio de degradación.

### 6.3 PRUEBA DE COMPATIBILIDAD

La prueba de compatibilidad consistió en recoger 4 muestras de cada almidón de 40 ml cada una y se mezclaron con los aditivos más comúnmente usados en lodos de perforación, como se observa desde la **Tabla 27** a la **Tabla 30** para el almidón de yuca G 8060 y desde la **Tabla 31** a la **Tabla 34**, para el almidón MDX 060. En la **Figura 22** y se encuentran las muestras en sus recipientes debidamente rotuladas y listas para sus observaciones.

**Figura 22.** Prueba de compatibilidad para el almidón G 8060.



**Figura 23.** Prueba de compatibilidad para el almidón MDX 060.



**Tabla 27.** Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + Bentonita.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca G 8060 + Bentonita</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	5,22	Fluido muy viscoso de color feldgrau, además presenta una sola fase y formación de grumos.
Marzo 18 del 2011	5,41	El fluido se mantiene de igual manera a la lectura anterior.
Marzo 22 del 2011	5,88	El fluido muestra ligeras burbujas.
Marzo 24 del 2011	5,74	Presenta un color más oscuro, del resto se mantuvo igual.
Marzo 28 del 2011	5,76	Se mantuvo igual.
Abril 1 del 2011	5,82	Se mantiene viscoso, pero fluye, inodoro y además presenta gran cantidad de burbujas pequeñas.
Abril 6 del 2011	5,73	Se mantiene igual.

**Tabla 28.** Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + CaCO<sub>3</sub>.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca G 8060 + CaCO<sub>3</sub></b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	5,60	Fluido poco viscoso de color crema opaco con poca formación de grumos y burbujas.
Marzo 18 del 2011	5,79	Se observa precipitación del CaCO <sub>3</sub> , es decir dos fases en el fluido, inodoro y poca espuma.
Marzo 22 del 2011	5,97	Se observaron dos fases, la primera el almidón y la segunda el CaCO <sub>3</sub> , debido a precipitación, sin burbujas ni grumo.
Marzo 24 del 2011	5,92	Aún presenta precipitado y ligero oscurecimiento en el color del almidón.
Marzo 28 del 2011	5,89	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	5,92	Presenta 3 fases, inferior CaCO <sub>3</sub> , intermedio de color miel claro y la parte superior de color miel, inicio de formación de hongos.
Abril 6 del 2011	4,52	Presencia de más hongos.

**Tabla 29.** Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + SAPP.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca G 8060 + SAPP</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	4,75	Fluido nada viscoso de color curuba, y formación considerable de grumos y burbujas.
Marzo 18 del 2011	3,83	Se presenta poca precipitación y aún conserva espumas.
Marzo 22 del 2011	3,83	Igual cantidad de precipitado, con burbujas en la superficie, cero cantidades de grumos.
Marzo 24 del 2011	3,89	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	3,76	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	3,76	Dos fases, inferior de color blanco y la superior de color miel claro, cero burbujas, cero hongos con un olor poco fuerte.
Abril 6 del 2011	3,85	Igual con presencia de pequeñas burbujas.

**Tabla 30.** Formato de observación del almidón de yuca G 8060 + NaOH.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca G 8060 + NaOH</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	4,82	Debido a la agitación dada su color inicial opta por un curuba, de una sola fase.
Marzo 18 del 2011	4,49	Se comporta de igual manera.
Marzo 22 del 2011	4,46	Se mantiene de igual manera.
Marzo 24 del 2011	4,52	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	4,47	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	4,37	Se mantiene igual.
Abril 6 del 2011	4,64	Se mantiene igual.

**Tabla 31.** Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + Bentonita.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca MDX 060 + Bentonita</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	5,61	Fluido excesivamente viscoso de color feldgrau de una fase, sin formación de burbujas y presenta grumos.
Marzo 18 del 2011	6,09	Se mantiene de igual manera.
Marzo 22 del 2011	5,59	Se mantiene igual, excepto que genera poca cantidad de grumos.
Marzo 24 del 2011	5,42	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	4,46	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	4,12	Aun bastante viscoso, olor fuerte con formación de burbujas.
Abril 6 del 2011	4,26	Aspecto cementado.

**Tabla 32.** Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + CaCO<sub>3</sub>.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca MDX 060 + CaCO<sub>3</sub></b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	6,57	Fluido acuoso de color crema sin formación de burbujas ni grumos y de una sola fase.
Marzo 18 del 2011	6,50	Presenta precipitado.
Marzo 22 del 2011	5,92	Se conserva igual con poca precipitación.
Marzo 24 del 2011	5,86	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	5,63	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	5,58	Tres fases, agua, almidón y CaCO <sub>3</sub> , presencia de burbujas con un olor fuerte.
Abril 6 del 2011	5,61	Se mantiene igual.

**Tabla 33.** Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + SAPP.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca MDX 060 + SAPP</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	5,58	Fluido acuoso de color blanco de una fase sin burbujas ni grumos.
Marzo 18 del 2011	4,15	Se mantiene igual.
Marzo 22 del 2011	4,14	Se mantiene igual.
Marzo 24 del 2011	4,27	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	4,09	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	4,16	Se mantiene igual.
Abril 6 del 2011	4,20	Se mantiene igual.

**Tabla 34.** Formato de observación del almidón de yuca MDX 060 + NaOH.

<b>Formato de observaciones del almidón de yuca MDX 060 + NaOH</b>		
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>Observaciones</b>
Marzo 16 del 2011	6,71	Fluido acuoso de una fase de color blanco, sin burbujas ni grumos.
Marzo 18 del 2011	5,55	Se mantiene igual.
Marzo 22 del 2011	3,21	Se mantiene igual.
Marzo 24 del 2011	3,29	Se mantiene igual.
Marzo 28 del 2011	3,08	Se mantiene igual.
Abril 1 del 2011	3,17	Se mantiene igual.
Abril 6 del 2011	2,97	Olor fuerte, del resto se mantiene igual.

## 6.4 PRUEBA DE RENDIMIENTO

Se realizó un análisis químico del agua dulce que se usó durante las pruebas de laboratorio. Los datos son reportados en la **Tabla 35**.

Altitud: 959 metros sobre el nivel del mar  
Temperatura promedio: 28 °C  
Presión atmosférica: 13,4 psi

**Tabla 35.** Análisis para el agua dulce.

ANALISIS PARA EL AGUA DULCE								
T (°F)	Ø600 (RPM)	Va (cP)	Densidad (lb / gal)	pH	ppm Cl <sup>-</sup>	ppm Ca <sup>++</sup>	ppm NaCl	ppm CaCO <sub>3</sub>
77	3	1,5	8,34	6,82	64	29	110	81

En la **Tabla 36** y **Tabla 37**, se presentan los datos obtenidos en las pruebas de rendimiento para los almidones MDX 060 y G 8060 respectivamente, donde se definió un patrón de adición de 50 lb / bbl para cada uno, pudiéndose observar como el aumento de concentración genera un incremento en la Va.

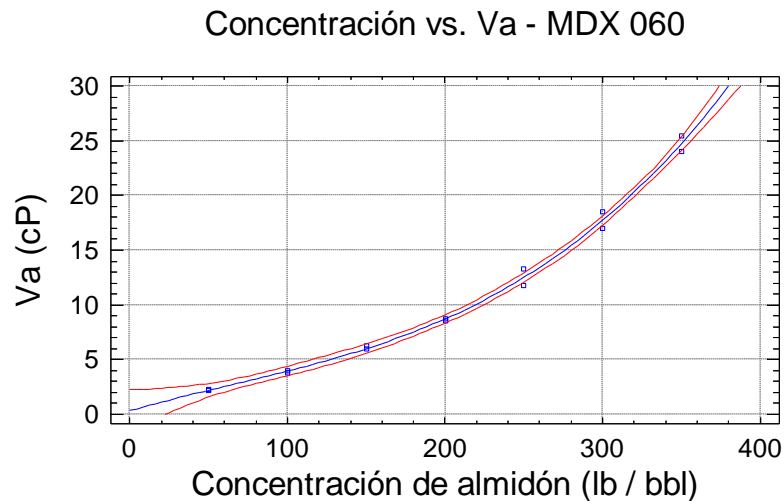
En la **Figura 24** y **Figura 25**, se puede observar las curvas de rendimiento respectivas para cada tipo de almidón, donde la línea azul representa el valor medio de las pruebas realizadas para ambos bloques.

Con esta curva se busca obtener un polinomio que represente los datos obtenidos, donde el coeficiente  $R^2$  indica que el modelo matemático describe el porcentaje de variabilidad de la Va.

**Tabla 36.** Prueba de rendimiento en agua dulce para el almidón MDX 060.

BLOQUE	PRUEBA DE RENDIMIENTO EN AGUA DULCE – MDX 060					
	PROCEDIMIENTO		600 RPM	Va (cP)	Densidad del lodo (lb / gal)	pH
	PRODUCTO	CONCENTRACION				
1	Almidón de Yuca MDX 060 (lb / bbl)	50	4,5	2,25	8,33	7,15
		100	8	4	8,45	6,82
		150	12,5	6,25	8,71	6,74
		200	17,5	8,75	9	6,53
		250	26,5	13,25	9,25	6,35
		300	38	19	9,4	6,23
		350	51	25,5	9,45	6,14
2	Almidón de Yuca MDX 060 (lb / bbl)	50	4,3	2,15	8,33	7,16
		100	7,5	3,75	8,4	6,95
		150	12	6	8,65	6,75
		200	17	8,5	8,95	6,58
		250	23,5	11,75	9,1	6,36
		300	34	17	9,3	6,2
		350	48	24	9,4	6,14

**Figura 24.** Curva de rendimiento - Almidón de yuca MDX 060.



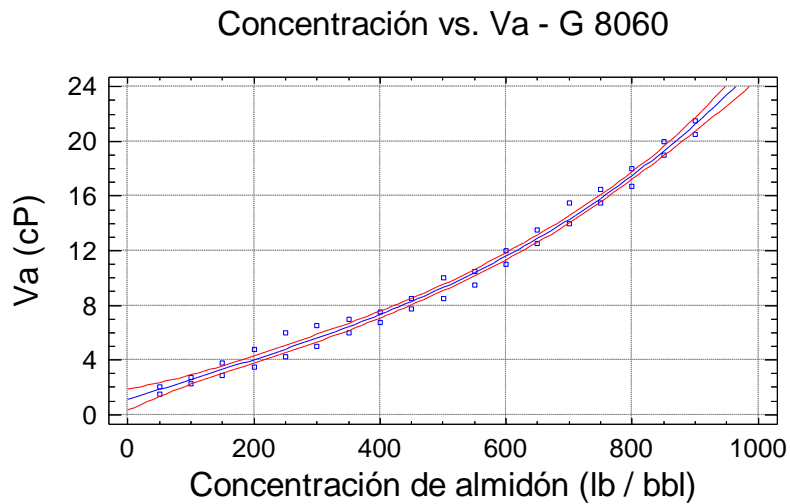
$$Va = 5,11111E - 7 \times C^3 - 0,0000953571 \times C^2 + 0,0405615 \times C + 0,332143$$

$$R^2 = 0,9955$$

**Tabla 37.** Prueba de rendimiento en agua dulce para el almidón G 8060.

BLOQUE	PRUEBA DE RENDIMIENTO EN AGUA DULCE – G 8060					
	PROCEDIMIENTO		600 RPM	Va (cP)	Densidad del lodo (lb / gal)	pH
	PRODUCTO	CONCENTRACION				
1	Almidón de Yuca G 8060 (lb / bbl)	50	4	2	8,5	5,73
		100	5,5	2,75	8,6	4,94
		150	7,5	3,75	9,1	4,78
		200	9,5	4,75	9,2	4,73
		250	12	6	9,4	4,67
		300	13	6,5	9,5	4,64
		350	14	7	9,6	4,61
		400	15	7,5	9,63	4,61
		450	17	8,5	9,85	4,58
		500	20	10	10	4,57
		550	21	10,5	10,05	4,57
		600	24	12	10,06	4,56
		650	27	13,5	10,06	4,54
		700	31	15,5	10,07	4,54
		750	33	16,5	10,1	4,53
		800	36	18	10,1	4,52
		850	40	20	10,3	4,52
900	43	21,5	10,6	4,51		
2	Almidón de Yuca G 8060 (lb / bbl)	50	3	1,5	8,6	5,7
		100	4,5	2,25	8,9	4,88
		150	5,8	2,9	9,2	4,74
		200	7	3,5	9,3	4,68
		250	8,5	4,25	9,45	4,64
		300	10	5	9,62	4,61
		350	12	6	9,66	4,59
		400	13,5	6,75	9,8	4,57
		450	15,5	7,75	9,87	4,57
		500	17	8,5	9,9	4,57
		550	19	9,5	9,9	4,56
		600	22	11	10	4,55
		650	25	12,5	10,05	4,54
		700	28	14	10,1	4,53
		750	31	15,5	10,15	4,53
		800	33,5	16,75	10,2	4,52
		850	38	19	10,25	4,51
900	41	20,5	10,3	4,51		

**Figura 25.** Curva de rendimiento - Almidón de yuca G 8060.



$$Va = 1,32554E - 8 \times C^3 - 0,00000356768 \times C^2 + 0,0148543 \times C + 1,11426$$

$$R^2 = 0,9897$$

Donde:

C = Concentración de almidón (lb / bbl)

Va = Viscosidad aparente (cP)

Con los polinomios establecidos se busca encontrar las concentraciones correspondientes para una viscosidad aparente de 15 cP. Luego se define un intervalo de confianza del 85 % y se establecen rangos en los cuales es posible encontrar dichos valores.

Almidón de yuca MDX 060:

$$5,11111E - 7 \times C^3 - 0,0000953571 \times C^2 + 0,0405615 \times C + 0,332143 = 15$$

$$C = 275,91 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \right]$$

Almidón de yuca G 8060:

$$1,32554E - 8 \times C^3 - 0,00000356768 \times C^2 + 0,0148543 \times C + 1,11426 = 15$$

$$C = 723,04 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \right]$$

En la **Tabla 38**, se encuentran los rangos de viscosidad y concentración en el cual es posible encontrar una viscosidad aparente de 15 cP definido para cada uno de los tipos de almidones con un nivel de confianza del 85 %. También se puede observar dichos rangos en la **Figura 26** y **Figura 27**.

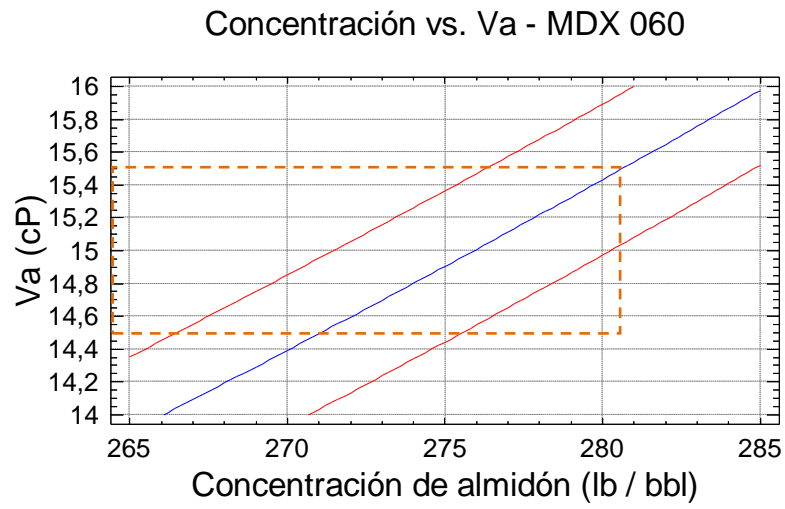
Seguidamente en la **Tabla 39** y **Tabla 40**, se realiza un análisis estadístico de las viscosidades aparentes obtenidas de ambos bloques para cada uno de los almidones.

**Tabla 38.** Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % para los almidones.

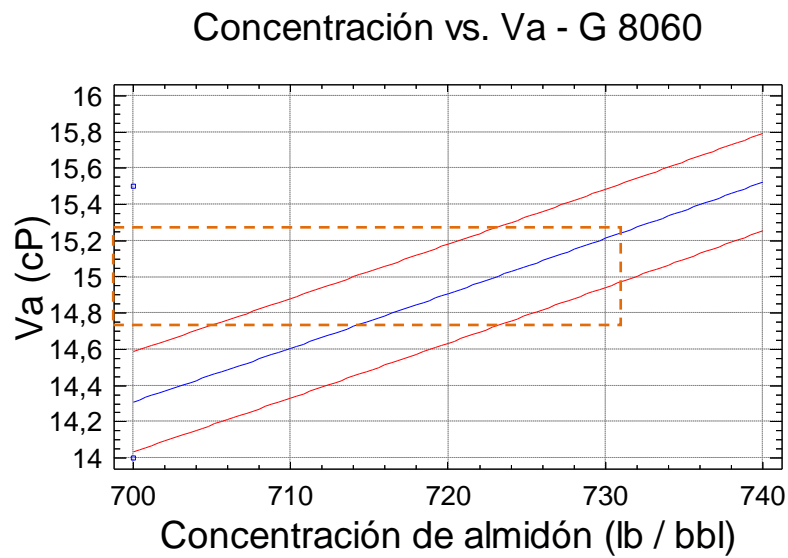
Intervalo de Confianza – MDX 060 (85,00 %)			
Va = 15,0091 (cP)		C = 276 (lb / bbl)	
Inferior	Superior	Inferior	Superior
14,5479	15,4703	271,5343	280,3445

Intervalo de Confianza – G 8060 (85,00 %)			
Va = 14,9986 (cP)		C = 723 (lb / bbl)	
Inferior	Superior	Inferior	Superior
14,7264	15,2708	714,0023	731,8631

**Figura 26.** Variabilidad del 85 % - Almidón MDX 060.



**Figura 27.** Variabilidad del 85 % - Almidón G 8060.



**Tabla 39.** Análisis estadístico del rendimiento del almidón de yuca MDX 060 en agua dulce.

C (lb / bbl)	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
50	2	2,2	0,01	0,07	3,21%
100	2	3,88	0,03	0,18	4,56%
150	2	6,13	0,03	0,18	2,89%
200	2	8,63	0,03	0,18	2,05%
250	2	12,5	1,13	1,06	8,49%
300	2	17,75	1,13	1,06	5,98%
350	2	24,75	1,13	1,06	4,29%
<b>Total</b>	14	10,83	60,93	7,81	72,06%

**Tabla 40.** Análisis estadístico del rendimiento del almidón de yuca G 8060 en agua dulce.

C (lb / bbl)	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
50	2	1,75	0,13	0,35	20,20%
100	2	2,5	0,13	0,35	14,14%
150	2	3,33	0,36	0,60	18,08%
200	2	4,13	0,78	0,88	21,43%
250	2	5,13	1,53	1,24	24,15%
300	2	5,75	1,13	1,06	18,45%
350	2	6,5	0,5	0,71	10,88%
400	2	7,13	0,28	0,53	7,44%
450	2	8,13	0,28	0,53	6,53%
500	2	9,25	1,13	1,06	11,47%
550	2	10,0	0,5	0,71	7,07%
600	2	11,5	0,5	0,71	6,15%
650	2	13,0	0,5	0,71	5,44%
700	2	14,75	1,13	1,06	7,19%
750	2	16,0	0,5	0,71	4,42%
800	2	17,38	0,78	0,88	5,09%
850	2	19,5	0,5	0,71	3,63%
900	2	21,0	0,5	0,71	3,37%
<b>Total</b>	36	9,82	34,87	5,91	60,15%

Con esta serie de pruebas se pudo evidenciar que los almidones de yuca hidrolizados no cumplieron como viscosificantes en lodos de perforación debido a su bajo rendimiento.

## **6.5 PRUEBA DEL EFECTO DEL pH SOBRE LA VISCOSIDAD**

Debido a que los rangos de rendimiento para los almidones fueron lejanos en comparación de los productos comercialmente usados, se omitió esta prueba, ya que no tiene mayor relevancia realizar este estudio ya que no es factible su uso como viscosificante.

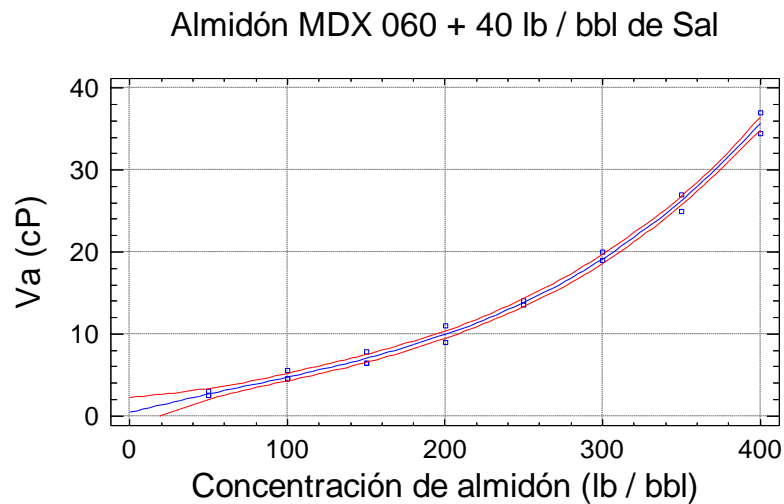
## **6.6 PRUEBA DEL EFECTO DE LA SAL SOBRE LA VISCOSIDAD**

Debido a que ambos almidones requieren de grandes concentraciones para llegar a una viscosidad aparente de 15 cP, se opta por el almidón MDX 060 como el mejor de los dos, y se procede a evaluarlo en un ambiente salino saturado y compararlo con un ambiente salino saturado bentonítico, como se muestra en la **Tabla 41** y **Tabla 42**, además en la **Figura 28** y **Figura 29**.

**Tabla 41.** Almidón MDX 060 en un ambiente salino saturado (40 lb / bbl de sal).

BLOQUE	Almidón MDX 060 + 40 lb / bbl de Sal		
	Concentración	$\theta_{600}$	Va
1	50	5	2,5
	100	9	4,5
	150	13	6,5
	200	18	9
	250	27	13,5
	300	38	19
	350	50	25
	400	69	34,5
2	50	6	3
	100	11	5,5
	150	15	7,5
	200	22	11
	250	28	14
	300	40	20
	350	54	27
	400	74	37

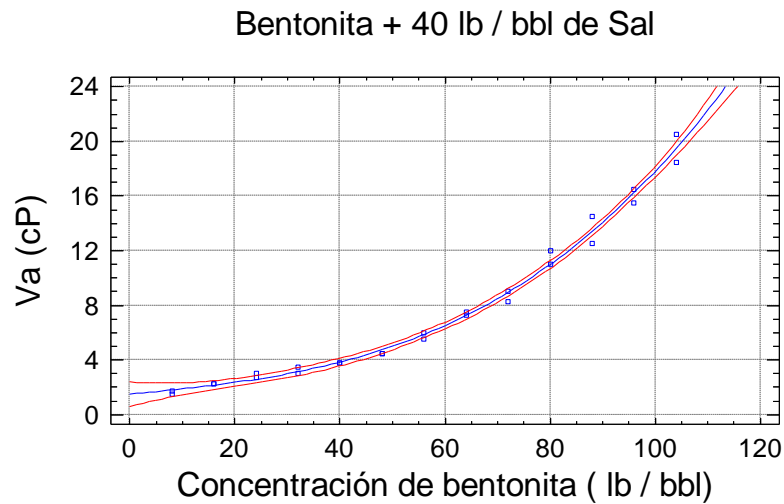
**Figura 28.** Curva de rendimiento del almidón MDX 060 + 40 lb / bbl de sal.



**Tabla 42.** Bentonita en un ambiente salino saturado (40 lb / bbl de sal).

BLOQUE	Bentonita + 40 lb / bbl de Sal		
	Concentración	Ø600	Va
1	8	3,5	1,75
	16	4,5	2,25
	24	5,5	2,75
	32	6	3
	40	7,5	3,75
	48	9	4,5
	56	11	5,5
	64	14,5	7,25
	72	16,5	8,25
	80	22	11
	88	25	12,5
	96	31	15,5
	104	37	18,5
2	8	3	1,5
	16	4,5	2,25
	24	6	3
	32	7	3,5
	40	7,5	3,75
	48	9	4,5
	56	12	6
	64	15	7,5
	72	18	9
	80	24	12
	88	29	14,5
	96	33	16,5
	104	41	20,5

**Figura 29.** Curva de rendimiento de bentonita + 40 lb / bbl de sal.



Se obtienen los polinomios correspondientes para cada uno y se procede a calcular la concentración a la cual se obtiene una viscosidad aparente de 15 cP. Además se realiza un análisis estadístico de los datos obtenidos para la viscosidad aparente en ambos bloques y son reportados en la **Tabla 43** y **Tabla 44**.

Almidón MDX 060:

$$Va = 5,33394E - 7 * C^3 - 0,000117552 * C^2 + 0,0497665 * C + 0,42145$$

$$R^2 = 0,9952$$

$$5,33394E - 7 * C^3 - 0,000117552 * C^2 + 0,0497665 * C + 0,42145 = 15$$

$$C = 262,16 \left[ \text{lb/bbl} \right]$$

Bentonita:

$$Va = 0,0000120932 * C^3 + 0,0000434136 * C^2 + 0,0377539 * C + 1,49738$$

$$R^2 = 0,9913$$

$$0,0000120932 * C^3 + 0,0000434136 * C^2 + 0,0377539 * C + 1,49738 = 15$$

$$C = 92,69 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \right]$$

Donde:

C = Concentración del producto (lb / bbl)

Va = Viscosidad aparente (cP)

**Tabla 43.** Análisis estadístico del almidón MDX 060 + 40 lb / bbl de sal.

C (lb / bbl)	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
50	2	2,75	0,13	0,35	12,86%
100	2	5,0	0,5	0,71	14,14%
150	2	7,0	0,5	0,71	10,10%
200	2	10,0	2,0	1,41	14,14%
250	2	13,75	0,13	0,35	2,57%
300	2	19,5	0,5	0,71	3,63%
350	2	26,0	2,0	1,41	5,44%
400	2	35,75	3,13	1,77	4,95%
<b>Total</b>	16	14,97	122,25	11,06	73,86%

**Tabla 44.** Análisis estadístico de la bentonita + 40 lb / bbl de sal.

<b>C (lb / bbl)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>
<b>8</b>	2	1,63	0,03	0,18	10,88%
<b>16</b>	2	2,25	0,0	0,0	0,0%
<b>24</b>	2	2,88	0,03	0,18	6,15%
<b>32</b>	2	3,25	0,13	0,35	10,88%
<b>40</b>	2	3,75	0,0	0,0	0,0%
<b>48</b>	2	4,5	0,0	0,0	0,0%
<b>56</b>	2	5,75	0,13	0,35	6,15%
<b>64</b>	2	7,38	0,03	0,18	2,40%
<b>72</b>	2	8,63	0,28	0,53	6,15%
<b>80</b>	2	11,5	0,5	0,71	6,15%
<b>88</b>	2	13,5	2,0	1,41	10,48%
<b>96</b>	2	16,0	0,5	0,71	4,42%
<b>104</b>	2	19,5	2,0	1,41	7,25%
<b>Total</b>	26	7,73	31,94	5,65	73,11%

Con estos resultados se puede afirmar que el almidón MDX 060 requiere una concentración de 262,16 lb / bbl en un medio salado y 275,91 lb / bbl en agua dulce, debido a que los almidones funcionan mejor en ambientes salinos. Por otro lado la bentonita requirió una concentración de 92,69 lb / bbl, mayor que en agua dulce, para alcanzar los 15 cP que se propone. Independientemente de estos resultados, se observa claramente que la bentonita sigue siendo mejor agente viscosificante en comparación al almidón MDX 060.

## 6.7 RENDIMIENTOS DE ALGUNOS VISCOSIFICANTES COMERCIALES

En la **Figura 30** se observa el rendimiento de algunos agentes viscosificantes comerciales que se pueden encontrar en laboratorio, con el propósito de comparar los rendimientos con los productos evaluados.

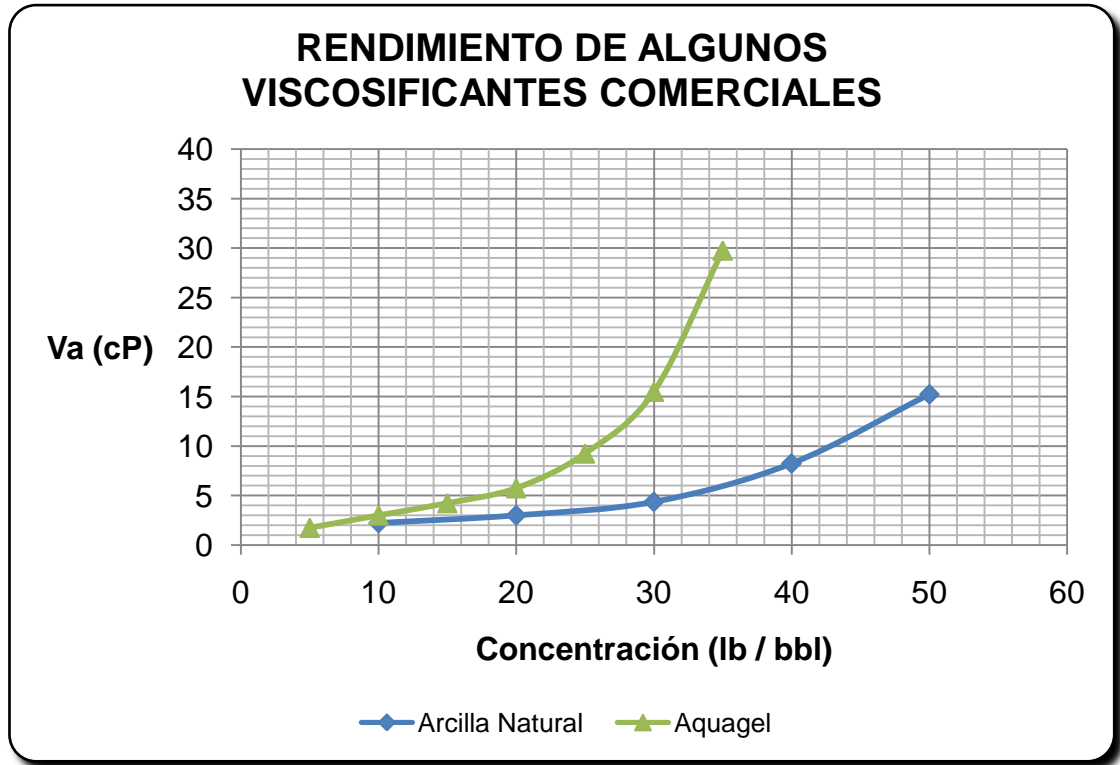
Los datos mostrados en la **Tabla 45**, fueron tomados del proyecto de grado titulado “FACTIBILIDAD DEL USO DE ALMIDON DE PLATANO COMO ADITIVO EN LODOS DE PERFORACION”, debido a que en el momento de realización de las pruebas no se encontraban estos productos dentro del inventario de laboratorio.

Las concentraciones para rendimientos óptimos para la arcilla natural y el aquagel son 49,65 lb / bbl y 30,23 lb / bbl respectivamente.

**Tabla 45.** Propiedades de algunos viscosificantes comerciales.

	<b>Concentración (lb / bbl)</b>	<b>Ø600 (RPM)</b>	<b>Va (cP)</b>
<b>Arcilla natural</b>	10	4,5	2,25
	20	6	3
	30	8,75	4,38
	40	16,5	8,25
	50	30,5	15,25
<b>Aquagel</b>	5	4	1,75
	10	7,5	3
	15	16,5	4,25
	20	38	5,75
	25	86,5	9,25
	30	3,5	15,5
	35	6	29,75

**Figura 30.** Rendimiento de algunos viscosificantes comerciales.



## 6.8 PRUEBA DE EXTENSIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA BENTONITA

Los resultados son mostrados en la **Tabla 46**.

**Tabla 46.** Prueba de extensión de las propiedades de la bentonita.

BLOQUE	BENTONITA	ALMIDÓN	CONCENTRACIÓN	600 RPM	Va (cP)
1	8	G 8060	0	4	2
			2,5	4	2
			5	4,5	2,25
		MDX 060	0	4	2
			2,5	4	2
			5	4,5	2,25
	16	G 8060	0	8	4
			5	8,5	4,25
			10	9	4,5
		MDX 060	0	8	4
			5	8,5	4,25
			10	9,5	4,75
	24	G 8060	0	17	8,5
			7,5	18	9
			15	20	10
		MDX 060	0	17	8,5
			7,5	20	10
			15	23	11,5
	32	G 8060	0	40	20
			10	41	20,5
			20	41,5	20,75
		MDX 060	0	40	20
			10	43	21,5
			20	52	26
40	G 8060	0	90	45	
		12,5	92	46	
		25	94	47	
	MDX 060	0	90	45	
		12,5	94	47	
		25	102	51	

**Tabla 46.** Prueba de extensión de las propiedades de la bentonita.

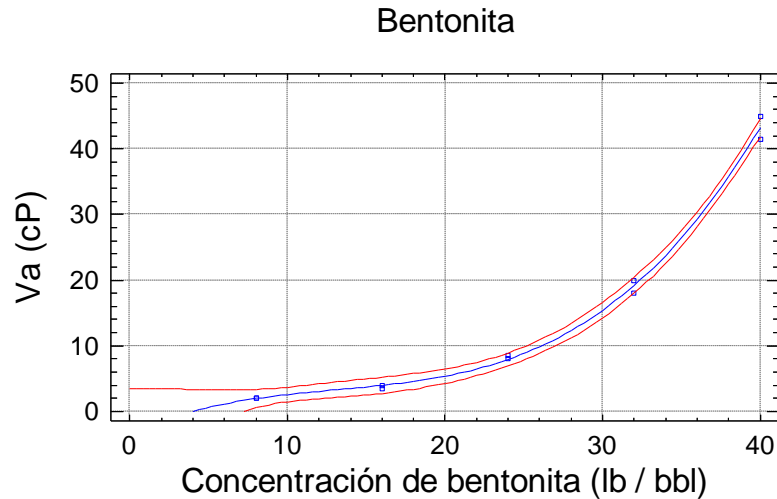
(Continuación)

BLOQUE	BENTONITA	ALMIDÓN	CONCENTRACIÓN	600 RPM	Va (cP)
2	8	G 8060	0	4	2
			2,5	3	1,5
			5	4,3	2,15
		MDX 060	0	4	2
			2,5	3,5	1,75
			5	5	2,5
	16	G 8060	0	7	3,5
			5	7,8	3,9
			10	8,8	4,4
		MDX 060	0	7	3,5
			5	8	4
			10	10,5	5,25
	24	G 8060	0	16	8
			7,5	17	8,5
			15	18	9
		MDX 060	0	16	8
			7,5	19	9,5
			15	24	12
	32	G 8060	0	36	18
			10	38	19
			20	39	19,5
		MDX 060	0	36	18
			10	41	20,5
			20	56	28
40	G 8060	0	83	41,5	
		12,5	87	43,5	
		25	91	45,5	
	MDX 060	0	83	41,5	
		12,5	91	45,5	
		25	110	55	

Se procede a evaluar el comportamiento de la bentonita sin la presencia del almidón de yuca, generando un polinomio y observando los rangos a un intervalo de confianza de 85 %.

En la **Figura 31** se puede observar la curva de rendimiento de la bentonita.

**Figura 31.** Curva de rendimiento de la bentonita.



$$Va = 0,00174967 * B^3 - 0,0687779 * B^2 + 1,11905 * B - 3,5$$

$$R^2 = 0,9962$$

$$0,00174967 * B^3 - 0,0687779 * B^2 + 1,11905 * B - 3,5 = 15$$

$$B = 29,76 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{bbl}} \right]$$

Donde:

B = Concentración de bentonita (lb / bbl)

Va = Viscosidad aparente (cP)

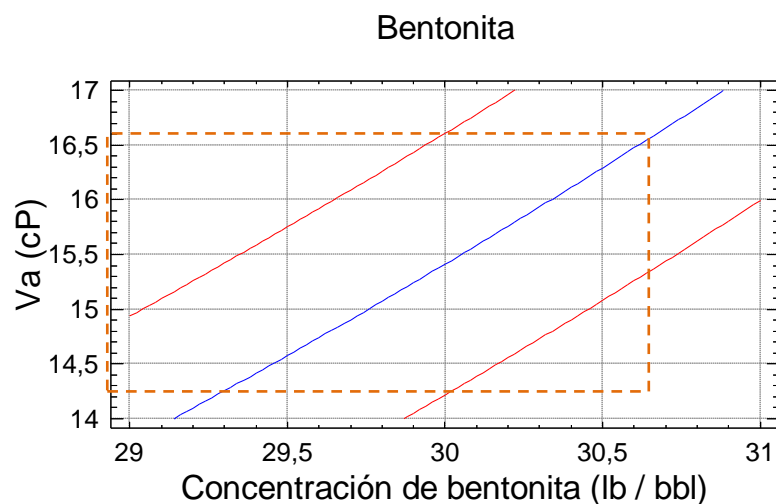
Como se observó, con el polinomio fue posible encontrar la concentración adecuada de la bentonita a la cual cumple el requisito de una viscosidad aparente de 15 cP con una concentración de 29,76 lb / bbl, además se realizó un estudio de confianza generando rangos en las cuales es posible encontrar el valor de 15 cP para la bentonita, como se observa en la **Tabla 47**. Además se

evalúan estos datos a una confiabilidad del 85 % como se observa en la **Tabla 47** y **Figura 32**.

**Tabla 47.** Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % para la bentonita.

Intervalo de Confianza – Bentonita (85,00 %)			
Va = 15,41 (cP)		C = 29,76 (lb / bbl)	
Inferior	Superior	Inferior	Superior
14,21	16,61	29,28	30,67

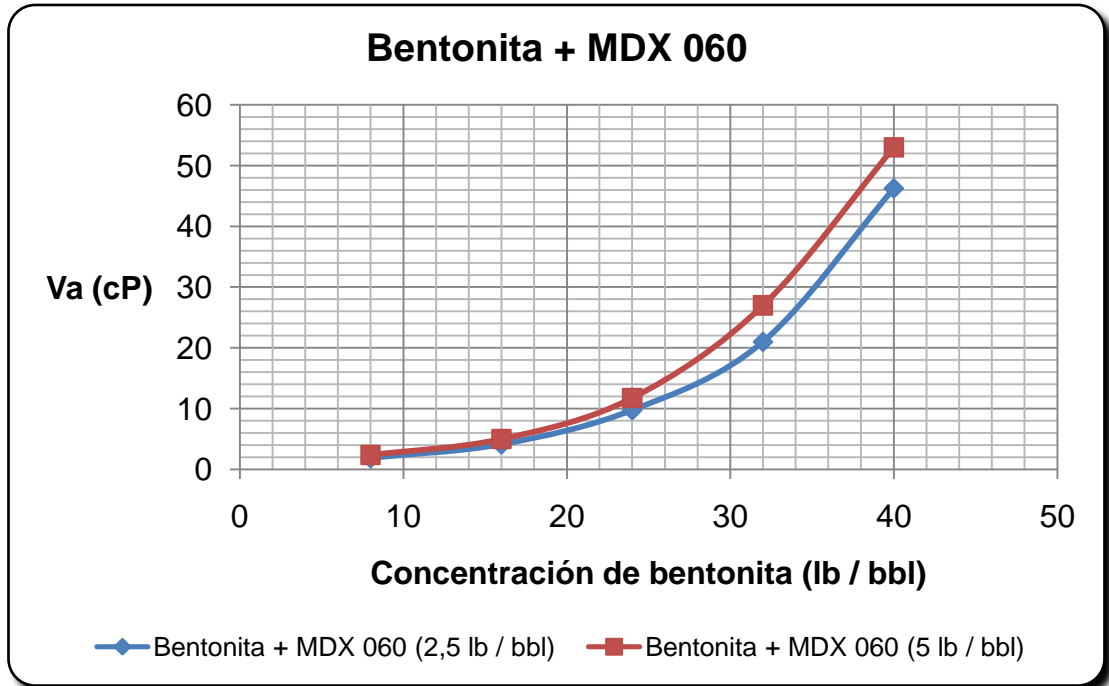
**Figura 32.** Variabilidad del 85 % - Bentonita.



Ya evaluada la bentonita sin la presencia de los almidones, ahora se procede a evaluar las diferentes combinaciones de bentonita y almidón, y poder observar el comportamiento individual de cada uno de los productos a diferentes concentraciones, y su influencia como extendedor de las propiedades de la bentonita. Esto se muestra en la **Figura 33** y **Figura 34**.

Además se generan los rangos a un intervalo de confianza de 85 % para cada uno, como se muestra en la **Tabla 48** y **Tabla 49**.

**Figura 33.** Curva de rendimiento de la bentonita + Almidón MDX 060.

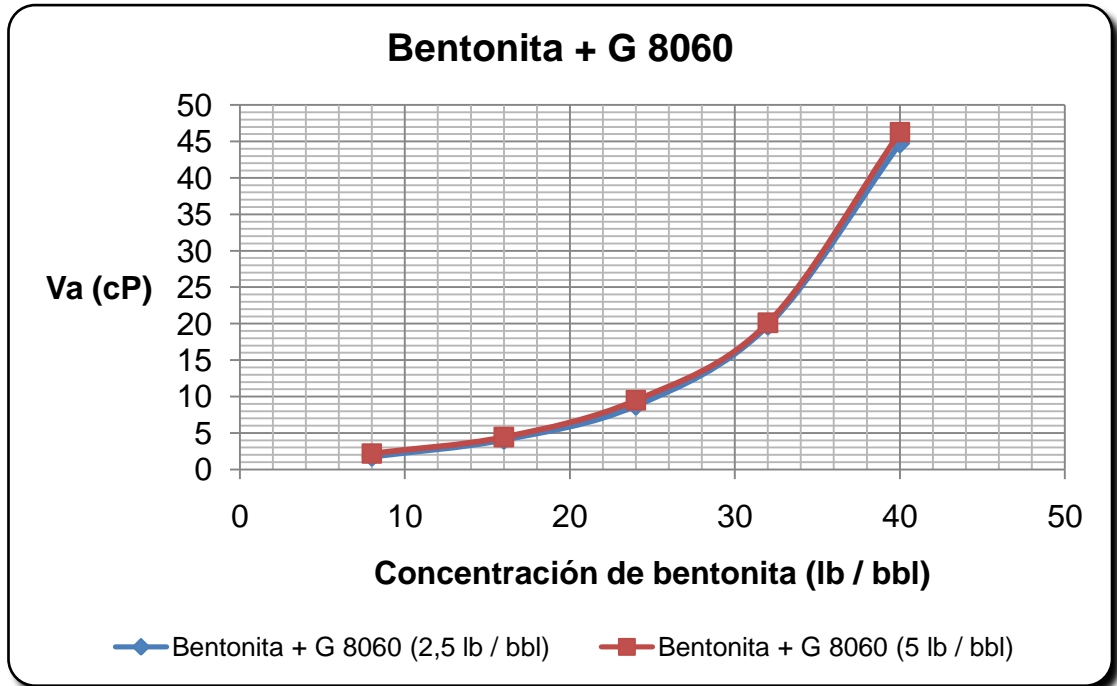


**Tabla 48.** Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % - MDX 060.

Intervalo de Confianza – Bentonita + 2,5 MDX 060 (85,00 %)			
Va = 15,60 (cP)		C = 29 (lb / bbl)	
Inferior	Superior	Inferior	Superior
14,94	16,26	28,59	29,39

Intervalo de Confianza – Bentonita + 5 MDX 060 (85,00 %)			
Va = 14,80 (cP)		C = 26 (lb / bbl)	
Inferior	Superior	Inferior	Superior
13,69	15,91	25,27	26,69

**Figura 34.** Curva de rendimiento de la bentonita + Almidón G 8060.



**Tabla 49.** Variabilidad con un intervalo de confianza del 85 % - G 8060.

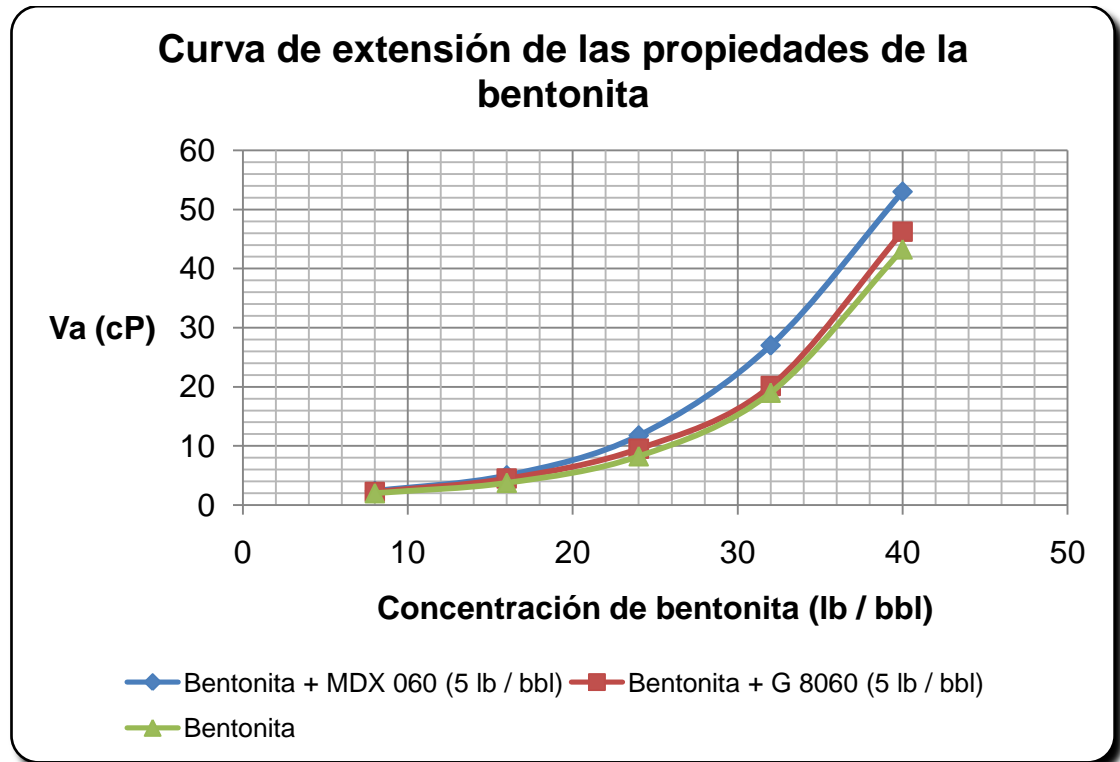
<b>Intervalo de Confianza – Bentonita + 2,5 G 8060 (85,00 %)</b>			
<b>Va = 14,40 (cP)</b>		<b>C = 29 (lb / bbl)</b>	
<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
13,54	15,27	28,43	29,53

<b>Intervalo de Confianza – Bentonita + 5 G 8060 (85,00 %)</b>			
<b>Va = 14,87 (cP)</b>		<b>C = 29 (lb / bbl)</b>	
<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
14,10	15,64	28,51	29,47

Como se observó, los almidones a una concentración de 5 lb / bbl presentan mejor comportamiento en la mejora como extendedores de las propiedades de

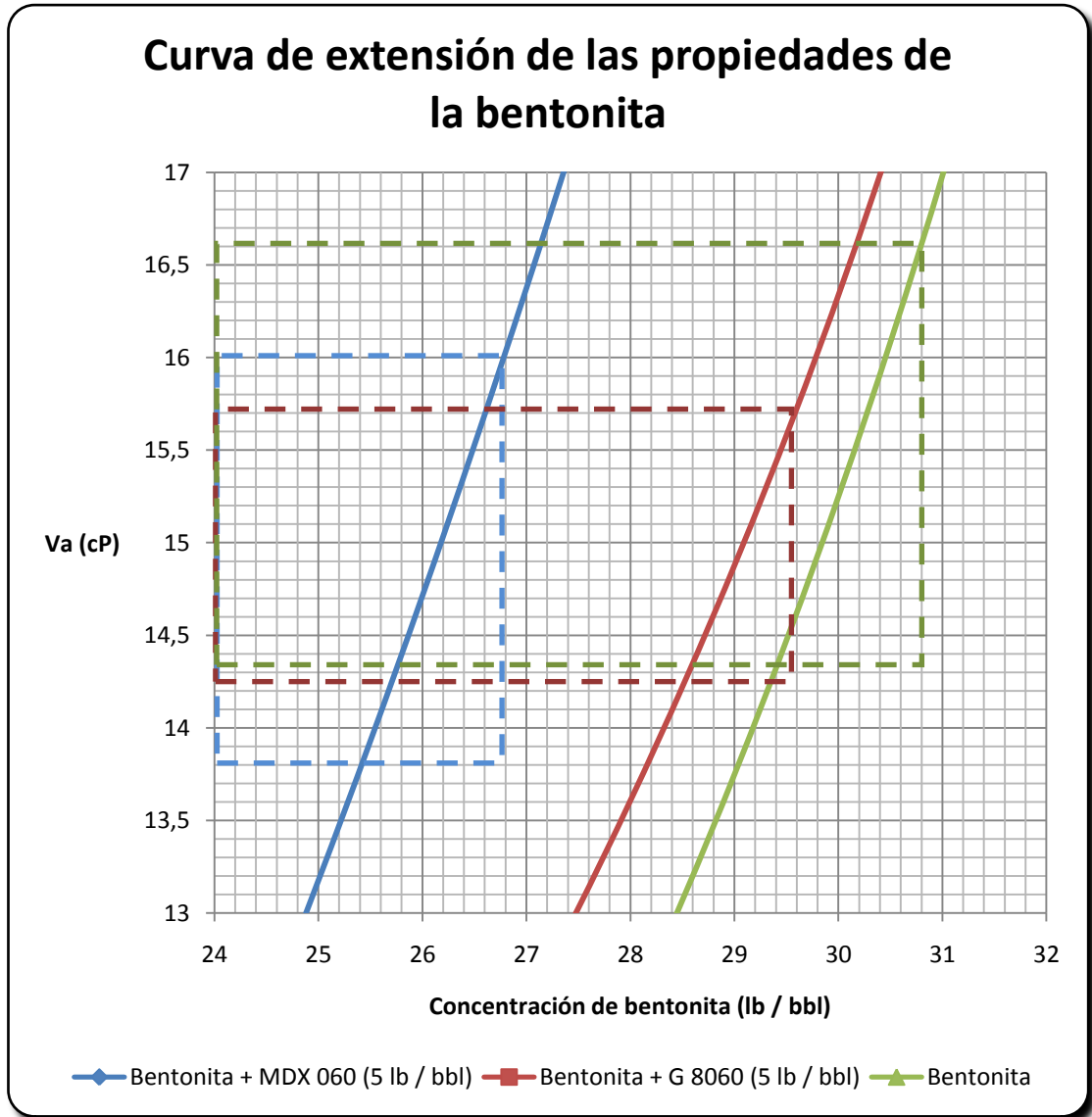
la bentonita. Este comportamiento será comparado con el rendimiento de la bentonita para poder observar la variación de la mejora, como se muestra en la **Figura 35**.

**Figura 35.** Curva de extensión de las propiedades de la bentonita.



Ahora se hará un aumento en el área de interés, es decir a una viscosidad de 15 cP y una concentración alrededor de 30 lb / bbl para estudiar los rangos de confianza de cada comportamiento. Como se muestra en la **Figura 36**.

**Figura 36.** Curva de extensión de las propiedades de la bentonita ampliada.



Como se pudo observar en la **Figura 36**, las propiedades de la bentonita se pudieron mejorar debido al almidón de yuca MDX 060 a una concentración en adiciones de 5 lb / bbl como producto extendedor comparado con el otro tipo de almidón.

Ya se definieron los valores de rendimiento para las condiciones propuestas, ahora se realiza análisis multifactorial con el fin de determinar cuál es el factor

más significativo y seguidamente hallar un polinomio que esté en función de todos los factores evaluados.

Para dicho análisis es necesario generar una matriz en la cual los datos representados estén normalizados, ya que si no se tiene en cuenta esta condición no existirá un grado de equivalencia a la hora de evaluarlo en el software.

Se debe optar por un límite inferior y uno superior, siendo estos representados generalmente por -1 y +1. A continuación se enuncia la ecuación para convertir valores no normalizados a valores normalizados:

$$V_{NORMALIZADO} = \frac{V_{REAL} - V_{MEDIO}}{V_{MEDIO [-1,0]}}$$

Donde:

$V_{NORMALIZADO}$  = Valor equivalente normalizado entre -1 y 1.

$V_{REAL}$  = Valor no normalizado que se quiere normalizar.

$V_{MEDIO}$  = Valor medio del rango no normalizado.

$V_{MEDIO [-1,0]}$  = Valor medio entre el límite inferior y  $V_{MEDIO}$ .

En la **Tabla 50** y **Tabla 51** se muestran los datos no normalizados a datos normalizados para la bentonita y el almidón de yuca.

**Tabla 50.** Datos reales a datos normalizados para la bentonita.

VALOR REAL (lb / bbl)	VALOR NORMALIZADO
8	-1
16	-0,5
24	0
32	0,5
40	1

**Tabla 51.** Datos reales a datos normalizados para cada tipo de almidón de yuca.

VALOR REAL (lb / bbl)	VALOR NORMALIZADO
0	-1
2,5	-0,8
5	-0,6
7,5	-0,4
10	-0,2
12,5	0
15	0,2
17,5	0,4
20	0,6
22,5	0,8
25	1

Ya definidos los datos normalizados, se procede a realizar la matriz con los datos obtenidos en la prueba de extensión de las propiedades de la bentonita definida anteriormente y, posteriormente generar un polinomio que interactuó todos los factores y por el cual se puede obtener el gráfico de superficie en el software Statgraphics Centurión XV, como se observa en la **Figura 37**.

$$Va = 17,4988 + 4,08003 * B^2 + 15,2729 * B + 1,78654 * MDX$$

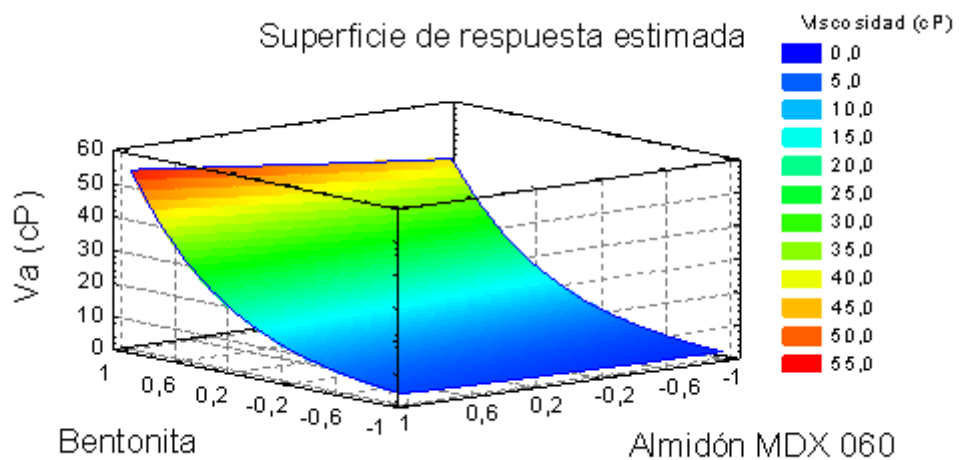
$$R^2 = 0,9975$$

Donde:

- Va = Viscosidad aparente (cP)
- B = Concentración de bentonita (lb / bbl)
- MDX = Concentración de almidón MDX 060 (lb / bbl)

En este polinomio no se tiene en cuenta el efecto del almidón de yuca G 8060, ya que como se observó en el anterior análisis de extensión de propiedades, no tiene mayor influencia en la participación del valor respuesta. Además en el proceso de generar el polinomio el software mostraba que tal almidón no tenía ningún efecto por lo cual era recomendable no tenerla en cuenta dentro del modelo.

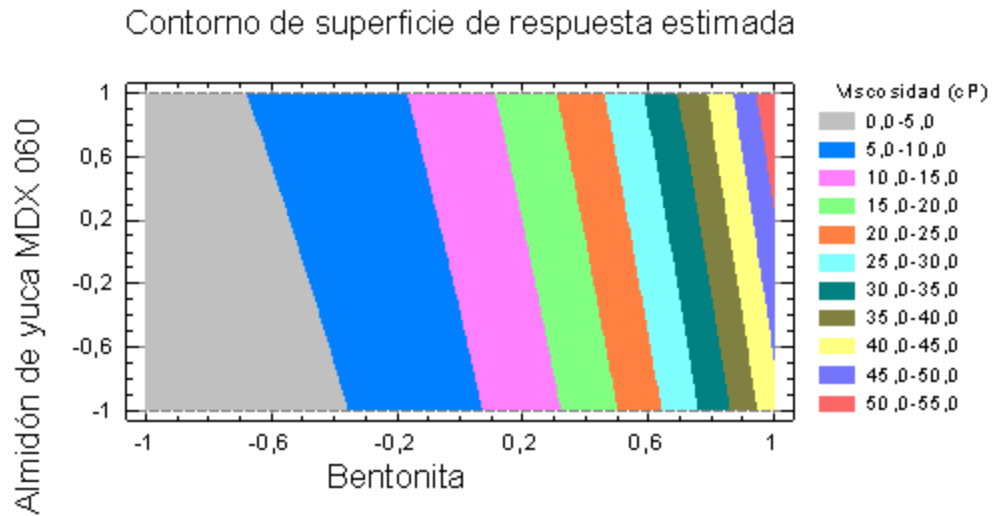
**Figura 37.** Superficie de respuesta estimada para la viscosidad aparente.



Como se observó, grandes cantidades de bentonita genera un aumento de la viscosidad, pero a su vez, el almidón de yuca MDX 060 tiene un efecto sobre esta, en la cual genera un comportamiento inclinado en la gráfica de superficie.

En la **Figura 38**, se puede observar la frontera para los 15 cP de viscosidad y una amplia gama de combinaciones de bentonita y almidón, que estadísticamente nos permite obtener este valor.

**Figura 38.** Contorno de superficie de respuesta estimada para la viscosidad aparente.



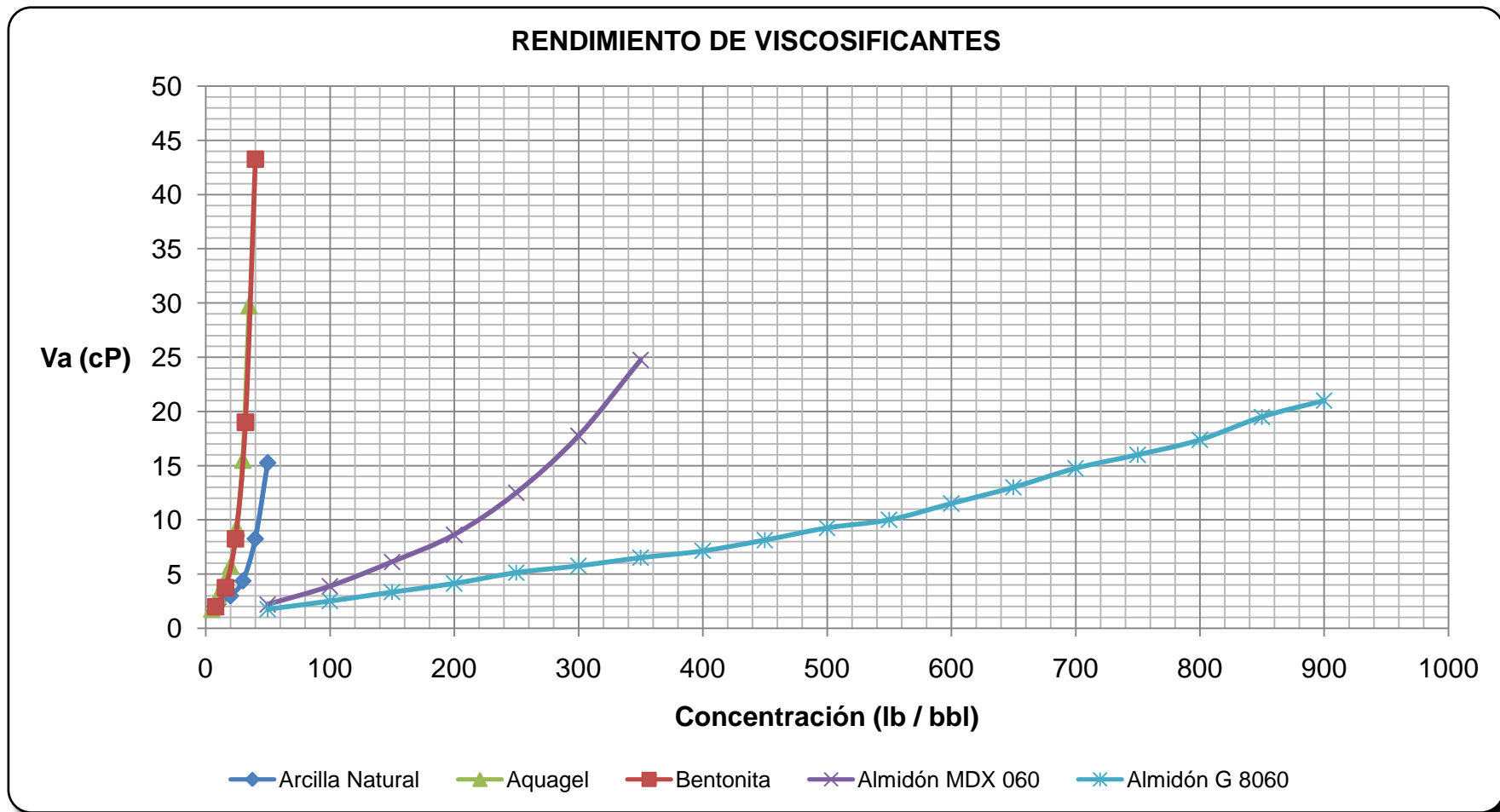
El análisis multifactorial proporciona información sobre todos los factores, y es factible ver las respuestas de un factor en diferentes niveles de otro factor en el mismo experimento<sup>32</sup>.

En esta gráfica es más fácil poder observar las diversas combinaciones que pueden generarse de bentonita y almidón para obtener una viscosidad aparente de 15 cP.

En la **Figura 39**, se muestra las curvas de rendimiento de los almidones comparados con agentes viscosificantes comerciales.

<sup>32</sup> KUEHL, Robert O. Diseño de Experimentos. Editorial Thomson Learning, 2 edición.

**Figura 39.** Rendimiento de los almidones comparados con los viscosificantes comerciales.



En la **Tabla 52** se resumen los valores de rendimiento para los diferentes sistemas evaluados.

**Tabla 52.** Rendimientos de los productos.

<b>Producto</b>	<b>Concentración a 15 cP (lb / bbl)</b>	<b>C (% en peso)</b>	<b>Rendimiento (bbl / Ton)</b>
<b>Aquagel</b>	49,65	12,42	42,44
<b>Arcilla natural</b>	30,23	7,95	68,32
<b>Bentonita</b>	29,76	7,84	69,36
<b>Almidón de yuca MDX 060</b>	275,91	44,08	11,44
<b>Almidón de yuca G 8060</b>	723,04	67,38	6,52
<b>Bentonita + 2,5 lpb de MDX 060</b>	29	7,65	71,12
<b>Bentonita + 5 lpb de MDX 060</b>	26	6,92	79,08
<b>Bentonita + 2,5 lpb de G 8060</b>	29	7,65	71,12
<b>Bentonita + 5 lpb de G 8060</b>	29	7,65	71,12
<b>40 lpb + bentonita</b>	92,69	20,94	23,73
<b>40 lpb + almidón MDX 060</b>	262,16	42,83	11,82

Como se evidencia en la tabla anterior, el mejor rendimiento es de 79,08 bbl / Ton, obtenido de la combinación entre la bentonita con dosis de 5 lb / bbl de almidón MDX 060.

## **6.9 PRUEBAS DEL ALMIDÓN COMO CONTROLADOR DE FILTRADO**

### **6.9.1 Pruebas para el lodo base.**

Para el lodo base se realizaron las pruebas correspondientes y se evaluaron sus propiedades, como se muestra en la **Figura 40** y **Tabla 53**, además se evaluó con un intervalo de confianza del 85%, como se observa en la **Tabla 54**.

**Figura 40.** Torta o Cake del lodo base.



Consistente  
Plástica  
< 1 / 32 "

**Tabla 53.** Resultados de las propiedades del lodo base.

<b>LODO BASE</b>			
<b>600 RPM</b>	45	<b>pH</b>	10,5
<b>300 RPM</b>	27	<b>Fuerza de Gel</b>	3
<b>Vp (cP)</b>	18	<b>Densidad del lodo (lb / bbl)</b>	8,71
<b>Yp (lb / 100 ft<sup>2</sup>)</b>	9	<b>Filtrado API (ml) @ 30 min</b>	7,2
<b>Va (cP)</b>	22,5	<b>Espesor (1 / 32 pulgada)</b>	< 1 / 32 "

<b>LODO BASE (Réplica)</b>			
<b>600 RPM</b>	54	<b>pH</b>	10,4
<b>300 RPM</b>	35	<b>Fuerza de Gel</b>	4
<b>Vp (cP)</b>	19	<b>Densidad del lodo (lb / bbl)</b>	8,7
<b>Yp (lb / 100 ft<sup>2</sup>)</b>	16	<b>Filtrado API (ml) @ 30 min</b>	6,9
<b>Va (cP)</b>	27	<b>Espesor (1 / 32 pulgada)</b>	< 1 / 32 "

**Tabla 54.** Análisis estadístico de las propiedades del lodo base.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
<b>Vp</b>	2	18,5	0,5	0,71	3,82%
<b>Yp</b>	2	3,25	0,13	0,35	10,88%
<b>Fuerza gel</b>	2	3,5	0,5	0,71	20,20%
<b>Filtrado</b>	2	7,05	0,04	0,21	3,01%

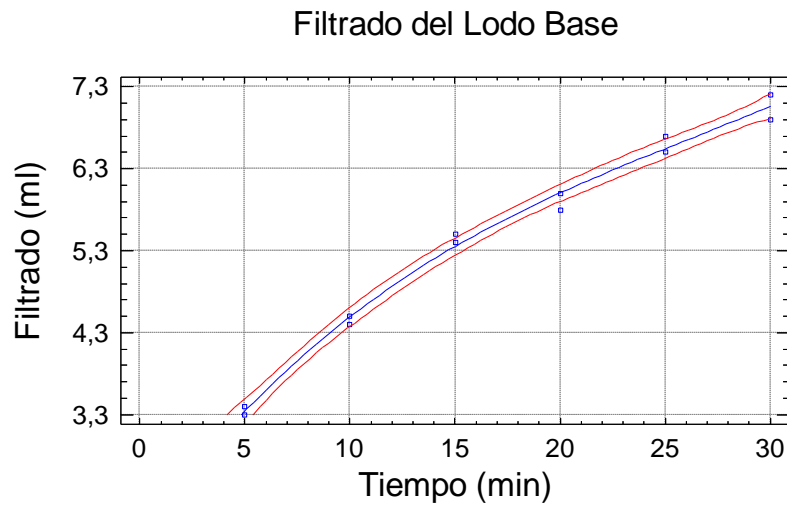
Además, se realizó un estudio de extensión de filtrado con respecto al tiempo, observando sus variaciones cada 5 minutos, como se muestra en la **Tabla 55**.

**Tabla 55.** Resultados de las pérdidas de filtrado para el lodo base.

LODO BASE		LODO BASE (Réplica)	
<b>5 min</b>	3,4 ml	<b>5 min</b>	3,3 ml
<b>10 min</b>	4,5 ml	<b>10 min</b>	4,4 ml
<b>15 min</b>	5,5 ml	<b>15 min</b>	5,4 ml
<b>20 min</b>	6,0 ml	<b>20 min</b>	5,8 ml
<b>25 min</b>	6,7 ml	<b>25 min</b>	6,5 ml
<b>30 min</b>	7,2 ml	<b>30 min</b>	6,9 ml

Se generó una curva para observar el comportamiento en las pérdidas de filtrado para el lodo base (ver **Figura 41**), donde a un tiempo de 30 minutos, se registró 7,2 ml para la prueba original y 6,9 ml para la prueba réplica, y se evaluó con un intervalo de confianza del 85%, como se observa en la **Tabla 56** y **Figura 42**, además un análisis estadístico con sus correspondientes datos en la **Tabla 57**.

**Figura 41.** Curva de las pérdidas de filtrado para el lodo base.



$$F = 0,000122222 * T^3 - 0,00959524 * T^2 + 0,353254 * T + 1,8$$

$$R^2 = 0,9920$$

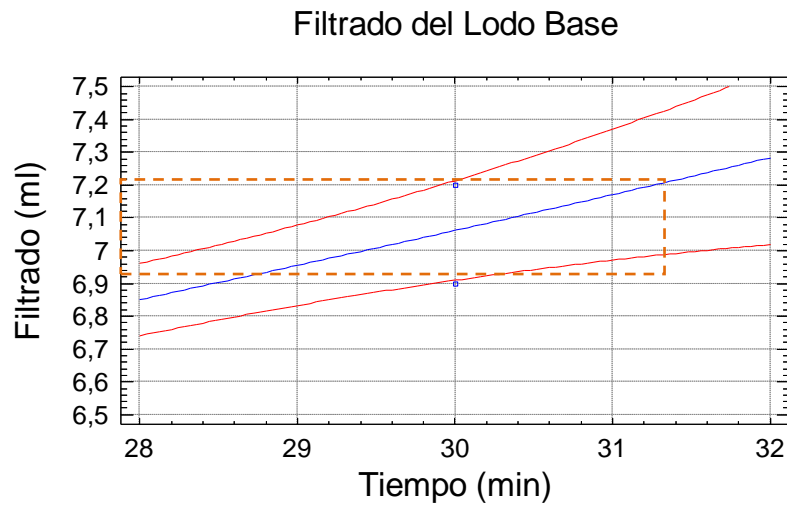
Donde:

- F = Cantidad de filtrado (ml)  
 T = Tiempo del filtrado (min)

**Tabla 56.** Variabilidad del 85 % - Pérdidas de filtrado del lodo base.

<b>Intervalo de Confianza (85 %) – Extensión de filtrado para el lodo Base</b>			
<b>T = 30 (min)</b>		<b>F = 7,06 (ml)</b>	
<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
28,56	31,39	6,91	7,21

**Figura 42.** Variabilidad del 85 % - Pérdidas de filtrado del lodo base.



**Tabla 57.** Análisis estadístico de las pérdidas de filtrado para el lodo base.

Tiempo	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
5	2	3,35	0,01	0,07	2,11%
10	2	4,45	0,01	0,07	1,59%
15	2	5,45	0,01	0,07	1,30%
20	2	5,9	0,02	0,14	2,40%
25	2	6,6	0,02	0,14	2,14%
30	2	7,05	0,04	0,21	3,01%
<b>Total</b>	12	5,47	1,74	1,32	24,10%

### 6.9.2 Prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado.

Los resultados de las pruebas de control de filtrado para los lodos contaminados y sus correspondientes tratamientos, se observa en la **Tabla 58**.

**Tabla 58.** Resultados de la prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado.

PRUEBA	PRUEBA DEL ALMIDON DE YUCA COMO CONTROLADOR DE FILTRADO											
	PROCEDIMIENTO		600 RPM	300 RPM	Vp (cP)	Yp (lb / 100 ft <sup>2</sup> )	Va (cP)	pH	Fuerza de gel	Densidad del lodo (lb / bbl)	Filtrado API (ml) @ 30 min	Espesor (1/32 pulgada)
	PASOS	TRATAMIENTO										
1	1	Base + 40 lpb Sal	134.5	118	16,5	101,5	67,25	8,6	65	9,1	11	3 / 32 "
	1.1	1 lpb Pac - L	82	74,5	7,5	67	41	10,87	45	8,8	9	2 / 32 "
	1.2	5 lpb Almidón G 8060	60	52	8	44	30	10,47	34	9,15	14,4	2 / 32 "
	1.3	5 lpb Almidón MDX 060	54	45	9	36	27	9,95	31	8,72	11	1 / 32 "
	2	Base + 1 lpb Cal	76	52	24	28	38	12,43	8	8,75	8,1	1 / 32 "
	2.1	1 lpb Pac - L	140	97	43	54	70	10,4	21	8,54	5	< 1 / 32 "
	2.2	5 lpb Almidón G 8060	90	61	29	32	45	10,52	11	8,7	7,3	1 / 32 "
	2.3	5 lpb Almidón MDX 060	98	68	30	38	49	10,51	18	8,58	6,8	1 / 32 "
	3	Base + 1 lpb Yeso	39	24	15	9	19,5	11,01	3	8,7	9,3	1 / 32 "
	3.1	1 lpb Pac - L	84	55	29	26	42	10,35	7	8,8	6	< 1 / 32 "
	3.2	5 lpb Almidón G 8060	59	37	22	15	29,5	10,26	5	8,75	7,2	1 / 32 "
	3.3	5 lpb Almidón MDX 060	74	46	28	18	37	10,79	6	8,8	5,9	1 / 32 "
	4	Base + 1 lpb CaCl <sub>2</sub>	95	70	25	45	47,5	9,07	34	8,72	7	1 / 32 "
	4.1	1 lpb Pac - L	103	69	34	35	51,5	10,61	11	8,78	6,2	< 1 / 32 "
	4.2	5 lpb Almidón G 8060	72	48	24	24	36	9,88	8	8,72	8	< 1 / 32 "
	4.3	5 lpb Almidón MDX 060	70	46	24	22	35	11,1	8	8,75	7,5	1 / 32 "

**Tabla 58.** Formato de la prueba del almidón de yuca como controlador de filtrado. (Continuación)

PRUEBA	PRUEBA DEL ALMIDON DE YUCA COMO CONTROLADOR DE FILTRADO											
	PROCEDIMIENTO		600 RPM	300 RPM	Vp (cP)	Yp (lb / 100 ft <sup>2</sup> )	Va (cP)	pH	Fuerza de gel	Densidad del lodo (lb / bbl)	Filtrado API (ml) @ 30 min	Espesor (1/32 pulgada)
	PASOS	TRATAMIENTO										
2	1	Base + 40 lpb Sal	146	133	13	120	73	8,62	71	9,05	10,5	3 / 32 "
	1.1	1 lpb Pac - L	70	65	5	55	35	10,8	43	8,8	8,2	2 / 32 "
	1.2	5 lpb Almidón G 8060	68	57	11	46	34	10,51	39	9,25	14	2 / 32 "
	1.3	5 lpb Almidón MDX 060	62,5	51	11,5	39,5	31,25	9,93	36	8,7	10,5	1 / 32 "
	2	Base + 1 lpb Cal	83,5	58	25,5	32,5	41,75	12,47	9	8,8	8	1 / 32 "
	2.1	1 lpb Pac - L	142	96	46	50	71	10,41	19	8,5	5	< 1 / 32 "
	2.2	5 lpb Almidón G 8060	84,5	52,5	32	20,5	42,25	10,53	12	8,75	7,2	1 / 32 "
	2.3	5 lpb Almidón MDX 060	103	77	26	51	51,5	10,63	24	8,78	6,8	1 / 32 "
	3	Base + 1 lpb Yeso	47	29	18	11	23,5	10,40	4	8,7	7,8	1 / 32 "
	3.1	1 lpb Pac - L	77	43	34	9	38,5	10,44	9	8,91	6	< 1 / 32 "
	3.2	5 lpb Almidón G 8060	63	41	22	19	31,5	10,37	9	8,7	7,2	1 / 32 "
	3.3	5 lpb Almidón MDX 060	88	53	35	18	44	10,64	4	9	6	1 / 32 "
	4	Base + 1 lpb CaCl <sub>2</sub>	68	42	26	16	34	9,8	41	8,75	6,2	1 / 32 "
	4.1	1 lpb Pac - L	89	51	38	13	44,5	10,34	13	8,9	6,5	< 1 / 32 "
	4.2	5 lpb Almidón G 8060	91	55	36	19	45,5	10,1	7	8,5	7	< 1 / 32 "
	4.3	5 lpb Almidón MDX 060	93	56	37	19	46,5	10,4	13	8,9	8	1 / 32 "

Los resultados de la extensión de filtrado de los lodos contaminados y tratados son reportados en la **Tabla 59**.

**Tabla 59.** Resultados de las pruebas de pérdidas de filtrado.

BLOQUE	PRUEBA DE EXTENSIÓN DE FILTRADO							
	PROCEDIMIENTO		FILTRADO (ml)					
	PASOS	TRATAMIENTO	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
1	1	Base + 40 lpb Sal	5,2	6,7	8	9,1	10,2	11
	1.1	1 lpb Pac - L	4	5,2	6,2	7,3	8,2	9
	1.2	5 lpb Almidón G 8060	6,9	9	10,5	12	13,5	14,4
	1.3	5 lpb Almidón MDX 060	4,8	6,5	7,6	9	10	11
	2	Base + 1 lpb Cal	3,4	4,7	5,5	6,6	7,4	8,1
	2.1	1 lpb Pac - L	2,9	3,8	4,4	4,6	4,8	5
	2.2	5 lpb Almidón G 8060	3,3	4,4	5,4	6	6,6	7,3
	2.3	5 lpb Almidón MDX 060	3,3	4,2	5,2	5,7	6,4	6,8
	3	Base + 1 lpb Yeso	4,5	6	6,9	7,7	8,5	9,3
	3.1	1 lpb Pac - L	2,9	3,9	4,5	5	5,5	6
	3.2	5 lpb Almidón G 8060	3,7	4,8	5,5	6,3	6,7	7,2
	3.3	5 lpb Almidón MDX 060	2,9	3,9	4,5	5	5,6	5,9
	4	Base + 1 lpb CaCl <sub>2</sub>	3,1	4,1	5	5,7	6,4	7
	4.1	1 lpb Pac - L	2,9	3,8	4,5	5,4	6	6,2
	4.2	5 lpb Almidón G 8060	3,5	4,8	5,7	6,7	7,5	8
	4.4	5 lpb Almidón MDX 060	3,2	4,5	5,3	6,3	7	7,5

**Tabla 59.** Resultados de la prueba de extensión de filtrado. (Continuación)

BLOQUE	PRUEBA DE EXTENSIÓN DE FILTRADO – (Réplica)							
	PROCEDIMIENTO		FILTRADO (ml)					
	PASOS	TRATAMIENTO	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
2	1	Base + 40 lpb Sal	5,5	7,1	8,4	9,6	10	10,5
	1.1	1 lpb Pac - L	3,8	5	5,9	7	7,7	8,2
	1.2	5 lpb Almidón G 8060	6,9	9,1	11	12,2	13	14
	1.3	5 lpb Almidón MDX 060	5	6	6,8	8	9	10,5
	2	Base + 1 lpb Cal	3	4	5,2	6	7	8
	2.1	1 lpb Pac - L	2,8	3,8	4,4	4,5	4,8	5
	2.2	5 lpb Almidón G 8060	3	4,4	5,4	6	6,6	7,2
	2.3	5 lpb Almidón MDX 060	3,3	4,2	5,2	5,7	6,4	6,8
	3	Base + 1 lpb Yeso	3,5	4,9	6	6,8	7,2	7,8
	3.1	1 lpb Pac - L	3	3,9	4,4	5	5,5	6
	3.2	5 lpb Almidón G 8060	3,5	4,5	5,5	6,3	6,7	7,2
	3.3	5 lpb Almidón MDX 060	3	3,9	4,5	5	5,6	6
	4	Base + 1 lpb CaCl <sub>2</sub>	3,1	4,1	5,2	5,5	6	6,2
	4.1	1 lpb Pac - L	2	3,5	4,5	5,4	6,2	6,5
	4.2	5 lpb Almidón G 8060	2,5	3,5	4,6	5,8	6,9	7
	4.4	5 lpb Almidón MDX 060	3	4,2	5,2	6,3	7,4	8

Con los datos obtenidos es necesario realizar un análisis estadístico entre el Bloque 1 y el Bloque 2 para algunas propiedades obtenidas para cada uno de los contaminantes y sus correspondientes tratamientos en la prueba de control de filtrado. Estos datos son mostrados desde la **Tabla 60** a la **Tabla 75**.

## PRUEBA DE CONTROL DE FILTRADO – CONTAMINACIÓN CON SAL

Para la prueba de control de filtrado para un lodo contaminado con sal, se genera un cuadro comparativo (ver **Figura 43**) donde se ilustra la variación del lodo contaminado con sus correspondientes tratamientos.

**Tabla 60.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	14,75	6,13	2,47	16,78%
Yp	2	110,75	171,13	13,08	11,81%
Fuerza gel	2	68,0	18,0	4,24	6,24%
Filtrado	2	10,75	0,13	0,35	3,29%

**Tabla 61.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal – Pac-L.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	6,25	3,13	1,77	28,28%
Yp	2	61,0	72,0	8,49	13,91%
Fuerza gel	2	44,0	2,0	1,41	3,21%
Filtrado	2	8,6	0,32	0,57	6,58%

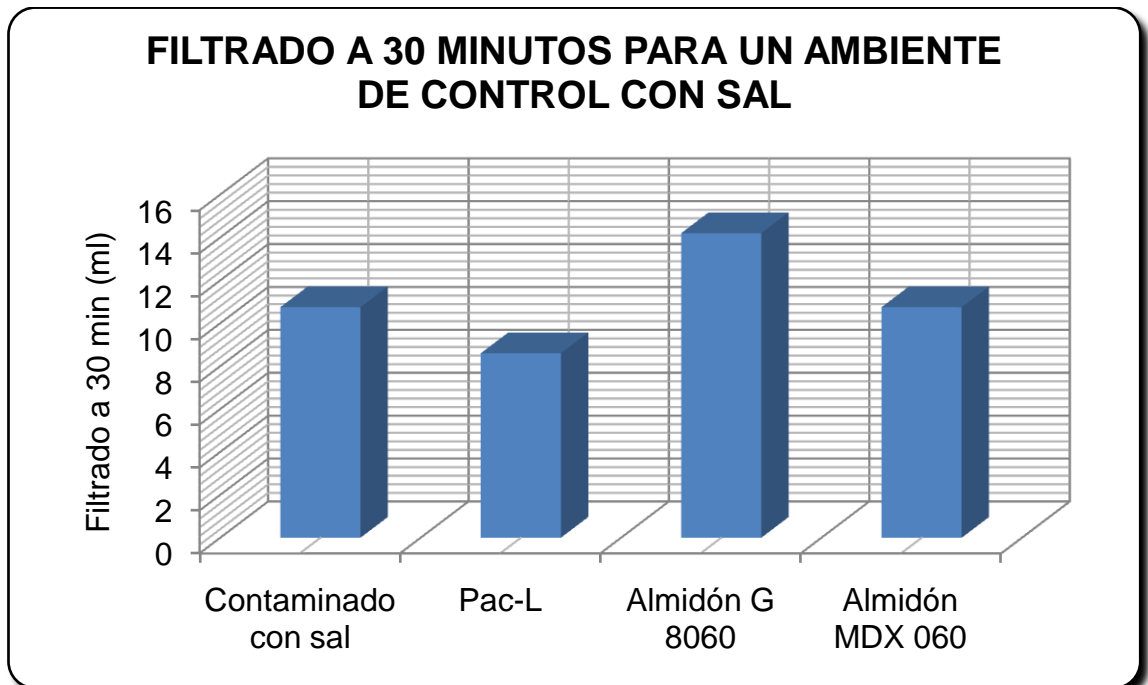
**Tabla 62.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal – G 8060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	9,5	4,5	2,12	22,33%
Yp	2	45,0	2,0	1,41	3,14%
Fuerza gel	2	36,5	12,5	3,54	9,69%
Filtrado	2	14,2	0,08	0,28	1,99%

**Tabla 63.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con sal – MDX 060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
<b>Vp</b>	2	10,25	3,13	1,77	17,25%
<b>Yp</b>	2	37,75	6,13	2,48	6,55%
<b>Fuerza gel</b>	2	33,5	12,5	3,54	10,55%
<b>Filtrado</b>	2	10,75	0,13	0,35	3,29%

**Figura 43.** Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con sal.



En la **Figura 44** se puede observar las propiedades obtenidas para cada una de las tortas del lodo contaminado con sal y sus tratamientos.

**Figura 44.** Retorta del lodo contaminado con sal y sus tratamientos.



En un sistema contaminado con sal se puede observar que los almidones evaluados no tienen mayor efectividad en comparación al Pac-L.

## PRUEBA DE CONTROL DE FILTRADO – CONTAMINACIÓN CON CAL

Para la prueba de control de filtrado para un lodo contaminado con cal, se genera un cuadro comparativo (ver **Figura 45**) donde se ilustra la variación del lodo contaminado con sus correspondientes tratamientos.

**Tabla 64.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	24,75	1,13	1,06	4,29%
Yp	2	30,25	10,13	3,18	10,52%
Fuerza gel	2	8,5	0,5	0,71	8,32%
Filtrado	2	8,05	0,01	0,07	0,88%

**Tabla 65.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal - Pac-L.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	44,5	4,5	2,12	4,77%
Yp	2	52,0	8,0	2,83	5,44%
Fuerza gel	2	20,0	2,0	1,41	7,07%
Filtrado	2	5,0	0,0	0,0	0,0%

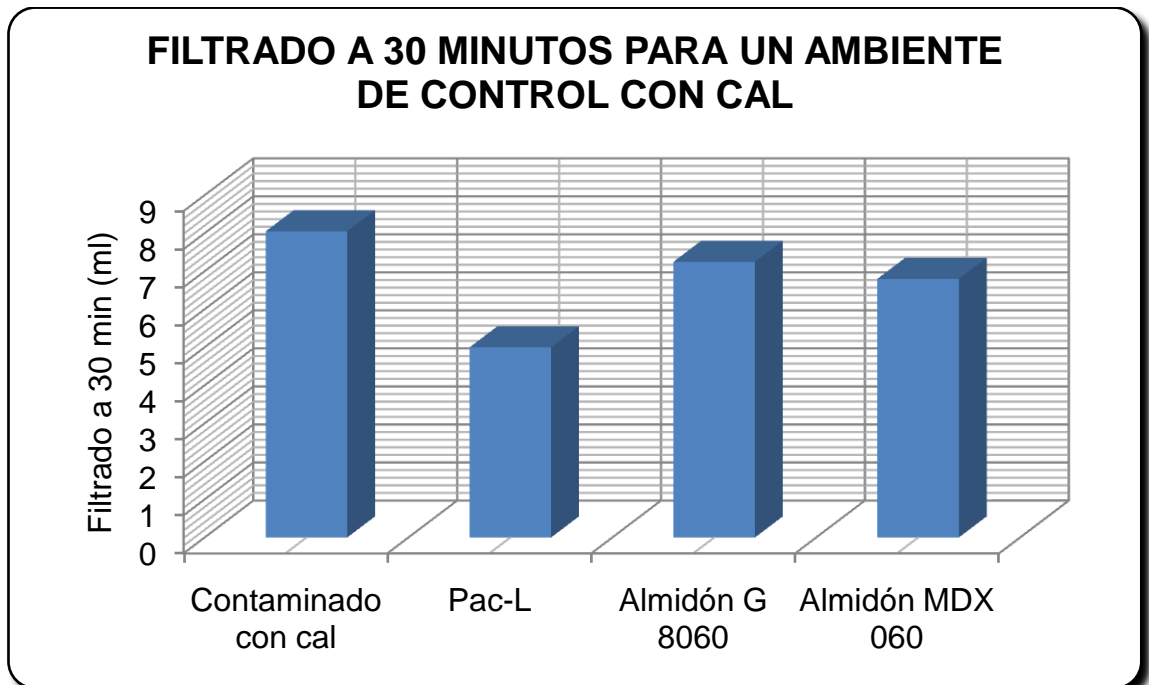
**Tabla 66.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal - G 8060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	30,5	4,5	2,12	6,96%
Yp	2	26,25	66,13	8,13	30,98%
Fuerza gel	2	11,5	0,5	0,71	6,15%
Filtrado	2	7,25	0,01	0,07	0,98%

**Tabla 67.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con cal - MDX 060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	28,0	8,0	2,83	10,10%
Yp	2	44,5	84,5	9,19	20,66%
Fuerza gel	2	21,0	18,0	4,24	20,20%
Filtrado	2	6,8	0,0	0,0	0,0%

**Figura 45.** Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con cal.



En la **Figura 46** se puede observar las propiedades obtenidas para cada una de las tortas del lodo contaminado con cal y sus tratamientos.

**Figura 46.** Retorta del lodo contaminado con cal y sus tratamientos.



**LODO CONTAMINADO**

Consistente

Plástica

1 / 32 "



**LODO TRATADO CON PAC-L**

Consistente

Plástica

1 / 32 "



**LODO TRATADO CON G 8060**

Consistente

Plástica

1 / 32 "



**LODO TRATADO CON MDX 060**

Consistente

Plástica

1 / 32 "

En un sistema contaminado con cal se puede observar que los almidones evaluados no tienen mayor efectividad en comparación al Pac-L.

## PRUEBA DE CONTROL DE FILTRADO – CONTAMINACIÓN CON YESO

Para la prueba de control de filtrado para un lodo contaminado con yeso, se genera un cuadro comparativo (ver **Figura 47**) donde se ilustra la variación del lodo contaminado con sus correspondientes tratamientos.

**Tabla 68.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	16,5	4,5	2,12	12,86%
Yp	2	10,0	2,0	1,41	14,14%
Fuerza gel	2	3,5	0,5	0,71	20,20%
Filtrado	2	8,55	1,125	1,06	12,41%

**Tabla 69.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso - Pac-L.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	31,5	12,5	3,54	11,22%
Yp	2	17,5	144,5	12,02	68,69%
Fuerza gel	2	8,0	2,0	1,41	17,68%
Filtrado	2	6,0	0,0	0,0	0,0%

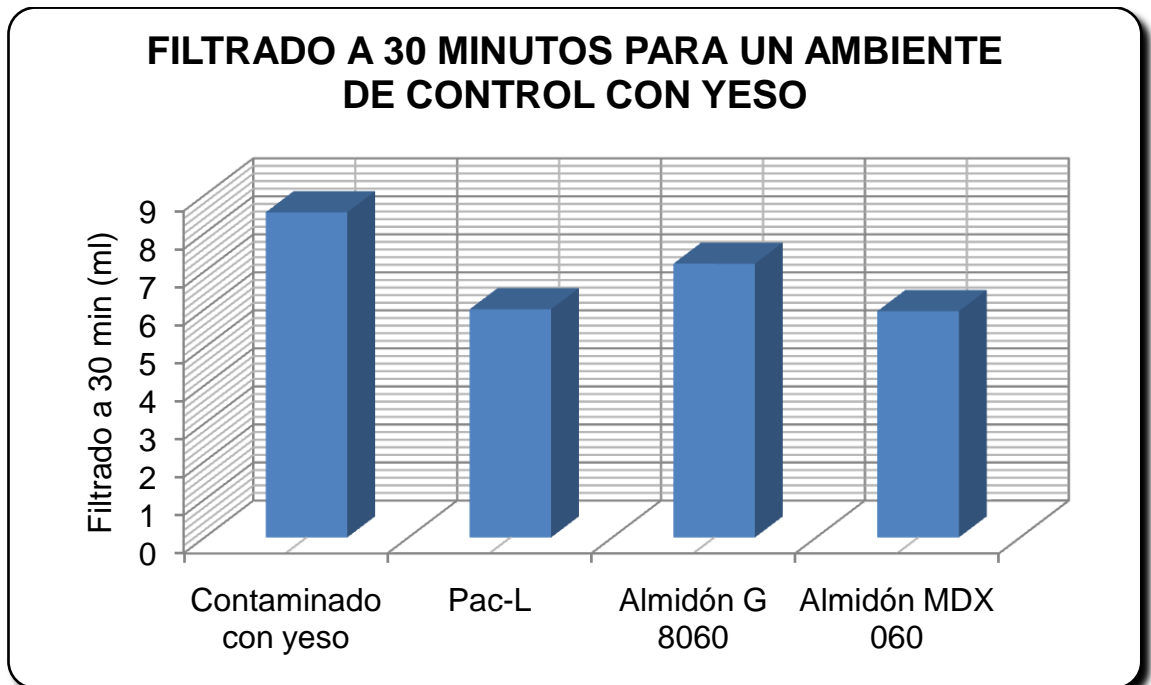
**Tabla 70.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso - G 8060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	22,0	0,0	0,0	0,0%
Yp	2	17,0	8,0	2,83	16,64%
Fuerza gel	2	7,0	8,0	2,83	40,41%
Filtrado	2	7,2	0,0	0,0	0,0%

**Tabla 71.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con yeso - MDX 060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	31,5	24,5	4,95	15,71%
Yp	2	18,0	0,0	0,0	0,0%
Fuerza gel	2	5,0	2,0	1,41	28,28%
Filtrado	2	5,95	0,01	0,07	1,19%

**Figura 47.** Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con yeso.



En la **Figura 48** se puede observar las propiedades obtenidas para cada una de las tortas del lodo contaminado con yeso y sus tratamientos.

**Figura 48.** Retorta del lodo contaminado con yeso y sus tratamientos.



**LODO CONTAMINADO**

Consistente  
Plástica  
1 / 32 "



**LODO TRATADO CON PAC-L**

Consistente  
Plástica  
1 / 32 "



**LODO TRATADO CON G 8060**

Consistente  
Plástica  
1 / 32 "



**LODO TRATADO CON MDX 060**

Consistente  
Plástica  
1 / 32 "

En un lodo contaminado con yeso, se observa que el tratamiento empleado con el almidón MDX 060 a una concentración de 5 lb / bbl, muestra un disminución del filtrado comparable con el Pac-L.

## PRUEBA DE CONTROL DE FILTRADO – CONTAMINACIÓN CON CaCl<sub>2</sub>

Para la prueba de control de filtrado para un lodo contaminado con CaCl<sub>2</sub>, se genera un cuadro comparativo (ver **Figura 49**) donde se ilustra la variación del lodo contaminado con sus correspondientes tratamientos.

**Tabla 72.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl<sub>2</sub>.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	25,5	0,5	0,71	2,77%
Yp	2	30,5	420,5	20,51	67,23%
Fuerza gel	2	37,5	24,5	4,95	13,20%
Filtrado	2	6,6	0,32	0,57	8,57%

**Tabla 73.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl<sub>2</sub> - Pac-L.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	36	8	2,83	7,86%
Yp	2	24,0	242,0	15,56	64,82%
Fuerza gel	2	12,0	2,0	1,41	11,79%
Filtrado	2	6,35	0,05	0,21	3,34%

**Tabla 74.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con CaCl<sub>2</sub> - G 8060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	30	72	8,49	28,28%
Yp	2	21,5	12,5	3,54	16,44%
Fuerza gel	2	7,5	0,5	0,71	9,43%
Filtrado	2	7,5	0,5	0,71	9,43%

**Tabla 75.** Análisis estadístico para el lodo contaminado con  $\text{CaCl}_2$  - MDX 060.

Propiedad	Frecuencia	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de Variación
Vp	2	30,5	84,5	9,19	30,14%
Yp	2	20,5	4,5	2,12	10,35%
Fuerza gel	2	10,5	12,5	3,54	33,67%
Filtrado	2	7,75	0,125	0,35	4,56%

**Figura 49.** Filtrado a 30 minutos para un ambiente de control con  $\text{CaCl}_2$ .



En la **Figura 50** se puede observar las propiedades obtenidas para cada una de las tortas del lodo contaminado con  $\text{CaCl}_2$  y sus tratamientos.

**Figura 50.** Retorta del lodo contaminado con  $\text{CaCl}_2$  y sus tratamientos.



En un sistema contaminado con  $\text{CaCl}_2$  se puede observar que los almidones evaluados no tienen mayor efectividad en comparación al Pac-L.

## 6.10 ANÁLISIS DE COSTOS

### Principales aspectos a tener en cuenta para seleccionar el aditivo.

- ❖ Costo del material.
- ❖ Disponibilidad del material.
- ❖ Otros problemas relacionados con la complicación que puede generar dicho material.
- ❖ Sector donde se está trabajando.
- ❖ Aspecto ambiental.

### Costos del material.

Según datos del proveedor el costo aproximado de producción de un litro, para los almidones de yuca MDX 060 y G 8060 es de \$ 2000 y \$ 3000 respectivamente.

### 6.10.1 Precios de agentes viscosificantes y controladores de filtrado.

En la **Tabla 76** se señalan los precios equivalentes de una cantidad de 50 lb para cada uno de los aditivos.

**Tabla 76.** Precio de viscosificantes y controladores de filtrado.

Producto	US\$	Peso (lb)
Almidón de yuca MDX 060	16,68	50
Almidón de yuca G 8060	22,40	50
Pac-L	114	50
Aquagel	16,8	50
Bentonita de Wyoming	15,52	50
Arcilla natural	9,94	50

De acuerdo con los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas para el rendimiento de los almidones de yuca comparado con varios productos viscosificantes se realiza un análisis de costos como se muestra en la **Tabla 77** para los productos evaluados que presentan un buen rendimiento.

### 6.10.2 Costos para la prueba de rendimiento.

**Tabla 77.** Costos para la prueba de rendimiento.

<b>Producto</b>	<b>Concentración (lb / bbl)</b>	<b>Costo (US\$ / bbl)</b>
Almidón de yuca MDX 060 en agua dulce	276	92,07
Almidón de yuca MDX 060 salmuera (40 lb / bbl)	262	87,4
Bentonita de Wyoming salmuera (40 lb / bbl)	93	28,87
Bentonita de Wyoming	30	9,31
Aquagel	50	16,8
Arcilla natural	30	5,96

### 6.10.3 Costos para pruebas de control del filtrado.

En la **Tabla 78**, se muestran los costos correspondientes para cada una de las cantidades utilizadas en la evaluación de control de filtrado.

Es importante señalar que las cantidades utilizadas para todas las contaminaciones fueron las mismas, el criterio para señalar que fue mejor, es la cantidad de filtrado que se obtuvo para cada tratamiento.

**Tabla 78.** Costos para la prueba de control de filtrado.

<b>Producto</b>	<b>Cantidad como controlador de filtrado (lb / bbl)</b>	<b>Costo (US\$ / bbl)</b>
Pac-L	1	2.28
Almidón de yuca MDX 060	5	1,67
Almidón de yuca G 8060	5	2,24

Según los costos enunciados anteriormente, es factible el uso del MDX 060 como controlador de filtrado en lodos contaminados con yeso, y también es bueno técnicamente al generar una retorta con buenas características y disminución del filtrado.

## CONCLUSIONES

- ❖ No es factible el uso de almidón de yuca hidrolizado como agente viscosificante.
- ❖ El rendimiento de la bentonita mejoró con el almidón de yuca hidrolizado MDX 060 como agente extendedor con adiciones de 5 lb / bbl.
- ❖ El almidón MDX 060 fue indiferente para mejorar el rendimiento en el lodo salado, su comportamiento fue muy cercano al que se analizó en agua dulce.
- ❖ Con la gráfica de superficie de respuesta de la influencia del almidón de yuca MDX 060 como extendedor de bentonita, se observan rangos de concentración en la cual se pueden obtener los 15 cP de viscosidad.
- ❖ No es factible el uso de almidón de yuca hidrolizado como agente controlador de filtrado en lodos contaminados debido a que necesita dosificaciones muy altas comparadas con las comerciales; excepto en lodos contaminados con yeso, en los cuales el almidón de yuca MDX 060 a 5 lb / bbl disminuye la cantidad de filtrado a niveles similares con el tratamiento de Pac-L.
- ❖ Haciendo una comparación en cuanto a costos, la implementación de almidón MDX 060 para lodos contaminados con yeso sería favorable ya que es un producto más económico.

- ❖ El diseño del experimento, conllevó a una mejor organización e interpretación de los datos como también a analizar estadísticamente las diferencias entre los diferentes aditivos comerciales y los aditivos utilizados en esta investigación.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Seguir con las investigaciones del uso de productos naturales en lodos de perforación, como sustituto de productos comerciales poco amigables con el medio ambiente.
  
- ❖ Hacer un estudio de factibilidad tanto técnica como económica de la implementación del almidón de yuca hidrolizado en estado sólido, teniendo en cuenta que los productos utilizados en esta investigación tienen en solución un porcentaje de agua, producto del proceso de hidrólisis, lo cual puede influir en el comportamiento de las propiedades del lodo.
  
- ❖ Evaluar otros tipos de modificaciones para el almidón de yuca ya sea física o químicamente con el fin de obtener un producto con excelentes propiedades.
  
- ❖ Realizar una modificación genética del almidón de yuca para aumentar el porcentaje de amilosa y de esta manera incrementar su eficacia, para posteriormente evaluarlo como aditivo en lodos de perforación.
  
- ❖ Buscar técnicas alternativas para mejorar la preservación del almidón de yuca, debido a que su posible uso en la industria petrolera estaría expuesto a condiciones ambientales severas.

## BIBLIOGRAFIA

**ACOSTA HERNANDEZ, Pedro León y OCHOA BAÑOS, Carlos Alberto.** Estudio de la factibilidad del uso del extracto de fique como viscosificante y controlador de filtrado en lodos de perforación. Tesis de Pregrado. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, 2002.

**ALMIDON.** Wikipedia – La Enciclopedia Libre. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Almidón>.

**ALVIS, Armando, VELEZ, Carlos A., VILLADA, Héctor S. y RADA MENDOZA, Maite.** Análisis físico-químico y morfológico de almidones. Disponible en: [www.scielo.cl/pdf/infotec](http://www.scielo.cl/pdf/infotec).

**ALVAREZ HERNANDEZ, Ricardo y SARMIENTO CELIS, Gabriel.** Utilización del almidón de yuca en lodos de completamiento y reparación de pozos de petróleo. Tesis de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander – UIS, 1982.

**BEMILLER, James y WHISTLER, Roy.** Starch: Chemistry and Technology. Third Edition. Copyright ©1984, 2009 Elsevier Inc.

**CARDENAS PARDO, Jhins Ledys y CHAUSTRE GALLO, Greis Nataly.** Estudio de la factibilidad del uso de mucílago de fique como dispersante

biodegradable en lodos de perforación. Tesis de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander – UIS, 2009.

**CEBALLOS, Hernán y DE LA CRUZ A, Gabriel Antonio.** La yuca en el tercer milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización.

**CENSO DE PLANTAS PROCESADORES DE YUCA PARA USO INDUSTRIAL RESULTADOS 2003.** Fuente DIAN. Disponible en: <http://www.dian.gov.co>.

**CENSO DE PLANTAS PROCESADORES DE YUCA PARA USO INDUSTRIAL RESULTADOS 2004.** Fuente: DIAN. Disponible en: <http://www.dian.gov.co>.

**CHAPMAN, J.W., WARD, I. y WILIAMSON, R.** New Viscosifier for Water Based Muds Based on a Genetically Modified Starch. Society of Petroleum Engineers. SPE 50723. 1999.

**FAJARDO MOLINA, Adrian Camilo y RODRIGUEZ RODRIGUEZ, Carlos José.** Factibilidad del uso del almidón de plátano como aditivo para lodos de perforación. Tesis de Grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander – UIS, 2010.

**ICA.** Manual Técnico de la yuca. INIAP – Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Disponible en: <http://www.ica.gov.co>.

**IMPACTO AMBIENTAL DE PRODUCTOS QUÍMICOS AUXILIARES USADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL ARGENTINA.** Anexo IV – Productos de acabados. REPAMAR. Auspiciado por GTZ. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org>.

**LUMMUS, James L. y AZAR, J.J.** Drilling fluids optimization. Copyright ©1986 by Penn Well Publishing Company.

**OKUMO, I. y ISEHUNWA, S.O.** Prediction of the viscosity of a water-base mud treated with cassava starch and potash at varying temperatures using factorial design. Society of Petroleum Engineers. SPE 111886. 2007.

**PDVSA.** Manual de fluidos de perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), 2002.

**RODRIGUEZ BERMUDEZ, Eliserio.** Reestructuración teórico – práctica de la guía de laboratorio de lodos y cementos. Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, 2007.

**SANCHEZ LOPEZ, Alberto.** Obtención de jarabes de glucosa por hidrólisis enzimática de almidón extraída de tres variedades de yuca (Amarga, Armenia y Chile), cultivadas en la provincia Guanenta (Santander). Tesis de Pregrado, Escuela de Química. Universidad Industrial de Santander, 2002.

**SIMONIDES, Hylke, SCHURINGA, Gerhard y GHALAMBOR, Ali.** Role of starch in designing nondamaging completion and drilling fluids. Society of Petroleum Engineers. SPE 73768. 2002.