

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DEL  
MUCÍLAGO DE FIQUE COMO PRODUCTO  
ESTABILIZADOR DE ARCILLAS**

**LUIS JOSÉ RESTÁN CALDERA  
GUSTAVO ADOLFO OSPINA HERNÁNDEZ**

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

**2005**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DEL  
MUCÍLAGO DE FIQUE COMO PRODUCTO  
ESTABILIZADOR DE ARCILLAS**

**LUIS JOSÉ RESTÁN CALDERA  
GUSTAVO ADOLFO OSPINA HERNÁNDEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director  
EMILIANO ARIZA LEÓN  
Ingeniero de Petróleos**

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

**2005**

A mi PADRE, El Señor Jesucristo, por Su Sublime Gracia que me enseñó a comprender por qué no depende del que quiere ni del que corre...

Al Dr. Luis Restán, a quien tengo el orgullo de decirle Papá, el gestor de todos mis logros...

A Iris, mi Madre, por haber hecho de mí el hombre que soy...

A mis hermanos, José y Juanca, por ser una inspiración para seguir luchando...

A Samuel David y su hermosa Blanca Luz, esa pequeña vida que es ahora lo más importante para mí y por lo tanto mi propia vida.

Luis J.

A Dios, fuente y dador de la vida, todos mis logros y mis alegrías son para Ti.

A Miriam, mi mamá hermosa, cuan valiosa eres madre. Que orgulloso me siento de ser hijo de una mujer sencillamente especial.

A Gustavo, mi papito, fiel reflejo del sacrificio y la inteligencia. Gracias papá, por brindarme todo tú apoyo.

Neto y Marie, mis hermanos, con los que cuento siempre y en todo lugar. Los adoro, y debemos estar orgullosos por la gran familia que Dios nos regaló.

A mis abuelos Doña Alicia (q.e.p.d.), Don José (q.e.p.d.), Don Oscar (q.e.p.d.) y Doña Nery, por todas las enseñanzas que me dan en el momento preciso.

A Diana Marcela Uribe Gómez, motor de mi vida. Gracias Dianita, siempre estas a mi lado cuando te necesito. Te adoro muchísimo.

A la Familia Ospina Rojas, y en especial a mis padrinos Oscar y Matilde. Tantos recuerdos y momentos felices junto a ustedes...nunca los olvidaré.

A la Familia Hernández Espinosa, y en especial a mi tía Nery y su esposo Pacho. Definitivamente, mi segunda familia.

A todos mis amigos, Marthica, Fredy, André, Robinsón, Kiriki, Cali, Richy, Mayí, Abril, Elberth y en especial a Luis Jo., compañero de mil batallas. Gracias, por compartir toda esta inolvidable experiencia contigo. Solo tú sabes lo que este trabajo significa.

A mi querida Montería, la villa soñada; y a Manizales, la bella villa, cuna del blanco blanco, el Once Caldas, el equipo que me enamora. ¡Ay Manizales del alma!

Tavo.

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros mayores agradecimientos a:

Ing. Emiliano Ariza, por involucrarnos en este proyecto de interés, cuyo aporte científico apunta a la solución de problemas en diversas regiones del departamento de Santander.

Ing. Carlos Reyes, por poner a nuestra disposición todos los recursos tecnológicos y operacionales con los que cuenta el centro de investigación más importante de la industria petrolera colombiana, el ICP, y convirtiéndose así en uno de los pilares fundamentales para la culminación de este proyecto.

Dr. Eric van Oort, por su humildad, al suministrarnos desinteresadamente material bibliográfico de suma importancia, para fundamentar conceptual y experimentalmente este proyecto.

Dr. Fersheed Mody e Ing. Mary Dimataris, Ing. Bernardo Paris e Ing. Alexander Camacho, por confiarnos valiosa información relacionada con su experiencia en la tecnología de lodos, con la cual realizan investigaciones para las compañías Shell y M-I, respectivamente.

Ing. Jaime Loza e Ing. Jesús Olaya, por instruirnos y asesorarnos técnicamente en el desarrollo de las pruebas llevadas a cabo en el Laboratorio de Tecnologías Operacionales del Instituto Colombiano del Petróleo.

Ing. Joaquín García, por su paciencia y carisma, en orientarnos sobre el diseño estadístico de experimentos, que muy posiblemente sin su ayuda no hubiera podido ser realizado.

Al personal del Laboratorio de Operaciones Unitarias de Ingeniería Química, Eduardo y Wilson, por el préstamo desinteresado de sus instalaciones, lo cual hacen comúnmente con el fin de fomentar la investigación.

Al Laboratorio de Lodos y Cementos de Ingeniería de Petróleos y su personal, Alexander y Félix, por brindarnos su colaboración en el uso del laboratorio, como también en el préstamo de equipos e instrumentos.

Al Laboratorio de Consultas Industriales de Química, y en especial a la Ing. Johanna Layton, cuya voluntad y eficiencia agilizó la culminación del proyecto.

Don José Dolores Díaz, un cálido campesino de Curití, por mostrarnos con su vasta experiencia, la realidad del cultivo de fique, el cual vio florecer y actualmente vive día a día su desalentador panorama.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS LUTITAS</b>	<b>6</b>
1.1 COMPOSICIÓN DE LAS LUTITAS	6
1.2 MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS	12
1.2.1 Nomenclatura de las arcillas	12
1.2.2 Principios estructurales	13
1.2.2.1 Unidades estructurales	13
1.2.2.2 Capa tetraédrica	16
1.2.2.3 Capas octaédricas	20
1.2.2.4 Capas tetraédricas frente a las octaédricas	22
1.2.2.5 Estructuras finales	24
1.2.2.6 Celda unidad y formula estructural 1:1	28
1.2.2.7 Celda unidad y formula estructural 2:1	30
1.2.3 Clasificación de las arcillas	31
1.2.3.1 Arcillas expandibles en agua	31
a. Montmorillonita	33
1.2.3.2 Arcillas no expandibles en agua	36
a. Illita	36
b. Clorita	38
c. Caolinita	40
1.2.3.3 Otras arcillas	41

a. Ínter estratificada	41
b. Vermiculita	42
c. Hormita	42
d. Minerales alófanos	43
1.2.4 Reacción química de las arcillas	44
1.2.4.1 Intercambio iónico	44
a. Intercambio catiónico	44
b. Intercambio aniónico	47
1.3 PRINCIPIOS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS LUTITAS	49
1.3.1 Balance de fuerzas	49
1.3.2 Presión de hinchamiento	51
1.4 TRANSPORTE EN LUTITAS	56
<b>2. ESTABILIZACIÓN DE LUTITAS</b>	<b>61</b>
2.1 CONDICIONES PARA LA ESTABILIDAD	61
2.2 PROBLEMAS DE LAS LUTITAS Y SOLUCIONES	68
2.2.1 Desintegración de ripios	68
2.2.2 Inestabilidad en las paredes del pozo	72
2.2.3 Embolamiento de la broca	72
2.3 ADITIVOS DE ESTABILIZACIÓN DE LUTITAS	76
2.3.1 Sales	76
2.3.1.1 KCl (Cloruro de Potasio)	76
2.3.1.2 NaCl (Cloruro de Sodio)	78
2.3.1.3 Cloruros y bromuros de Calcio/Magnesio/Zinc	79
2.3.1.4 Sales de acetato y formiato	80
2.3.2 Polímeros con afinidad especial hacia las lutitas	81
2.3.2.1 Polímeros anfotéricos	83
2.3.2.2 Polímeros funcionalmente catiónicos	84

2.3.2.3	Polímeros funcionalmente aniónicos	85
2.3.3	Asfáltenos, gilsonitas y grafitos	88
2.3.4	Azúcares y derivados del azúcar	89
2.3.5	(Poli-) gliceroles y (poli-) glicoles	90
2.3.6	Sistemas mezclados de polioles y sales	93
2.3.7	Silicatos	93
2.4	SISTEMAS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN	96
2.4.1	Tipo I: Lodos base agua dispersos - no inhibidos	96
2.4.2	Tipo II: Lodos base agua inhibidos convencionales	97
2.4.3	Tipo III: Lodos base agua osmóticos	98
2.4.4	Tipo IV: Lodos base agua/aceite de baja o nula invasión	99
2.4.5	Tipo V: Lodos base agua/aceite osmóticos de baja o nula invasión	100
2.5	PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIZADORES DE LUTITA	101
2.5.1	Prueba de tolerancia a la bentonita	103
2.5.1.1	Equipos	103
2.5.1.2	Procedimiento - Estudios reológicos	104
2.5.1.3	Procedimiento - Estudios de filtrado API	104
2.5.2	Prueba de dispersión	105
2.5.2.1	Equipos	106
2.5.2.2	Procedimiento	107
2.5.3	Prueba de acreción	111
2.5.3.1	Equipos	112
2.5.3.2	Procedimiento	113
2.5.4	Pruebas complementarias	114
2.5.4.1	Prueba de durabilidad	115
2.5.4.2	Prueba de dureza	116
2.5.4.3	Prueba de compatibilidad	118

2.5.4.4 Prueba de exposición simplificada	118
2.5.4.5 Prueba de aceptabilidad ambiental	119
<b>3. EL USO DEL MUCÍLAGO DE FIQUE COMO ESTABILIZADOR DE ARCILLAS</b>	<b>120</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE FIQUE	120
3.1.1 Clasificación taxonómica	121
3.1.2 Variedades cultivadas en Colombia	122
3.2 ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS Y UTILIZACIÓN DEL MUCÍLAGO DE FIQUE	123
3.3 POTENCIAL ESTABILIZADOR DEL MUCÍLAGO DE FIQUE	127
3.4 RECOLECCIÓN Y CONSERVACIÓN DEL MUCÍLAGO DE FIQUE	129
<b>4. DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	<b>136</b>
4.1 RECONOCIMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	136
4.2 SELECCIÓN DE LOS FACTORES Y SUS NIVELES	137
4.2.1 Factores	137
4.2.2 Niveles	139
4.3 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA	147
4.4 SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	148
4.5 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	149
4.5.1 Prueba de tolerancia a la bentonita	149
4.5.1.1 Estudios reológicos	149
4.5.1.2 Estudios de filtrado API	152
4.5.2 Prueba de dispersión	153
4.5.3 Prueba de acreción	155
4.5.4 Pruebas complementarias	158

4.5.4.1 Prueba de compatibilidad	158
4.5.4.2 Prueba de exposición simplificada	159
4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	160
4.6.1 Prueba de tolerancia a la bentonita (Estudios de filtrado API)	160
4.6.2 Prueba de dispersión	165
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>170</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>172</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>174</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>181</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Estructura tetraédrica	14
Figura 2. Capa de tetraedros dispuestos en red hexagonal	15
Figura 3. Estructura octaédrica	15
Figura 4. Capa de unidades octaédricas	16
Figura 5. Estructura cristalina y arreglo de capas	16
Figura 6. Empaquetamiento hexagonal	17
Figura 7. Red hexagonal de plano basal	17
Figura 8. Plano de los cationes de Si	18
Figura 9. Plano de O y OH compartidos	19
Figura 10. Distribución de cargas en los tetraedros	19
Figura 11. Capa central trioctaédrica	20
Figura 12. Capa central dioctaédrica	21
Figura 13. Capa superior de los octaedros	21
Figura 14. Distribución de cargas en los octaedros	22
Figura 15. Estructuras tetraédrica y octaédrica	23
Figura 16. Coordinación tetraédrica y octaédrica	24
Figura 17. Arreglos estructurales	24
Figura 18. Proceso de formación de las estructuras	25
Figura 19. Estructura de la sepiolita	26
Figura 20. Paralelogramo unidad de los planos 1 y 2	28
Figura 21. Paralelogramo unidad de los planos 3 y 4	28
Figura 22. Paralelogramo unidad del plano 5	29

Figura 23. Paralelogramos unidad	29
Figura 24. Celda unitaria y formula estructural (1:1)	29
Figura 25. Celda unitaria y formula estructural (2:1)	30
Figura 26. Bentonita de sodio y calcio en agua	32
Figura 27. SEM de una esmectita	34
Figura 28. Estructura de la montmorillonita	35
Figura 29. SEM de una illita	37
Figura 30. Estructura de la illita	38
Figura 31. SEM de una clorita	39
Figura 32. Estructura de la clorita	39
Figura 33. SEM de una caolinita	40
Figura 34. Estructura de la caolinita	41
Figura 35. Representación de esfuerzos de fondo	51
Figura 36. Dinámica molecular de la montmorillonita-Na	52
Figura 37. Prueba de odómetro	54
Figura 38. Difusión iónica y de presión en lutitas	59
Figura 39. Frentes de invasión alrededor del pozo	60
Figura 40. Representación Mohr-Coulomb	62
Figura 41. Presiones actuando sobre los ripios	70
Figura 42. Transmisión de presión para un lodo base aceite	71
Figura 43. Modelo para el embolamiento de la broca	73
Figura 44. Transmisión de presión para un lodo KCl	78
Figura 45. Transmisión de presión para un lodo CaCl <sub>2</sub>	80
Figura 46. Clasificación física de los polímeros	82
Figura 47. Imagen TEM del PHPA sobre una calcita	87
Figura 48. Transmisión de presión para un lodo KCl/PHPA	88
Figura 49. Transmisión de presión para un lodo gilsonita	88
Figura 50. Transmisión de presión - Melaza	90

Figura 51. Transmisión de presión para una solución PECP	91
Figura 52. Mecanismo de activación térmica - TAME	92
Figura 53. Transmisión de presión para un lodo Na-silicato	94
Figura 54. SEM de una lutita expuesta a un lodo silicato	95
Figura 55. Efecto de los sistemas de lodo en las lutitas	98
Figura 56. Equipo para envejecimiento por rolado	102
Figura 57. Tamices	107
Figura 58. Horno de secado	107
Figura 59. Recortes de lutita	109
Figura 60. Tamices 12/80 y recortes recuperados	109
Figura 61. Embolamiento de la broca /bit balling/	111
Figura 62. Barras de acreción	113
Figura 63. Montaje de la prueba de acreción	113
Figura 64. Equipo de durabilidad	115
Figura 65. Equipo de valoración de dureza	117
Figura 66. Lutita expuesta a la prueba de dureza	117
Figura 67. Planta de fique - <i>Furcraea macrophylla</i> . Baker	121
Figura 68. Hojas de fique para obtención del mucílago	129
Figura 69. Prensadora Berstor AF	130
Figura 70. Refrigeración del mucílago	130
Figura 71. Materia prima y productos del proceso de desfibrado	131
Figura 72. Prueba de degradación - Día 1	132
Figura 73. Prueba de degradación - Día 2	133
Figura 74. Prueba de degradación - Día 3	133
Figura 75. Prueba de degradación - Día 7	134
Figura 76. Prueba de degradación - Día 12	134
Figura 77. Comportamiento inhibitor - BTT Preliminar 1	140
Figura 78. Comportamiento inhibitor - BTT Preliminar 2	142

Figura 79. Tendencia del comportamiento inhibidor del mucílago	143
Figura 80. Mucílago de fique filtrado deshidratado	146
Figura 81. Comportamiento inhibidor - BTT Final 1	150
Figura 82. Comportamiento inhibidor - BTT Final 1 (Ampliada)	150
Figura 83. Efectos del pH sobre el comportamiento inhibidor - BTT Final 2	152
Figura 84. Efectos de la pérdida de filtrado - Réplica 1	152
Figura 85. Efectos de la pérdida de filtrado - Réplica 2	150
Figura 86. Prueba de dispersión - Réplica 1	154
Figura 87. Prueba de dispersión - Réplica 2	154
Figura 88. Prueba de dispersión - Réplica 3	155
Figura 89. Efecto del polímero sobre la acreción de partículas	156
Figura 90. Fotos de acreción	157
Figura 91. Prueba de acreción	158
Figura 92. Fotos de exposición simplificada	159
Figura 93. Ventana principal del STATGRAPHICS® PLUS 5.1.	160
Figura 94. Valores residuales de los estudios de filtrado API	164
Figura 95. Valores residuales de la prueba de dispersión	168

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composiciones típicas - Lutitas y Arcillas	7
Tabla 2. Clasificación de las lutitas problema debido al contenido de arcilla	9
Tabla 3. Ejemplos de lutitas problemáticas	11
Tabla 4. Nomenclatura de los minerales arcillosos	13
Tabla 5. Términos de referencia y sus equivalencias en diferentes lenguajes	13
Tabla 6. Capacidad de intercambio catiónico de minerales arcillosos	45
Tabla 7. Capacidad de intercambio aniónico de minerales arcillosos	49
Tabla 8. Resumen de flujos en lutitas manejados por diferentes gradientes	57
Tabla 9. Coeficientes de difusión para iones (en agua) y soluciones a 77°F	58
Tabla 10. Resultados experimentales en lutitas Pierre tipo I	58
Tabla 11. Viscosidades de sustancias de bajo peso molecular y del KCl relativas a la viscosidad del agua	68
Tabla 12. Detalles de la prueba de tolerancia a la bentonita	103
Tabla 13. Detalles de la prueba de dispersión	105
Tabla 14. Detalles de la prueba de acreción	112
Tabla 15. Detalles de la prueba de durabilidad	116
Tabla 16. Detalles de la prueba de dureza	118
Tabla 17. Batería de prueba ambiental	119

Tabla 18. Botánica taxonómica del fique	121
Tabla 19. Características generales de las Furcraeas en Colombia	122
Tabla 20. Características generales del mucílago de fique	126
Tabla 21. Composición del mucílago de fique	127
Tabla 22. Propiedades del mucílago y su aplicación en la investigación	132
Tabla 23. Prueba de degradación - Día 1	132
Tabla 24. Prueba de degradación - Día 2	133
Tabla 25. Prueba de degradación - Día 3	133
Tabla 26. Prueba de degradación - Día 7	134
Tabla 27. Prueba de degradación - Día 12	134
Tabla 28. Factores de diseño y su clasificación	137
Tabla 29. Sub-productos del mucílago de fique	140
Tabla 30. Sistemas de fluido - Prueba preliminar 1	140
Tabla 31. Sistemas de fluido - Prueba preliminar 2	141
Tabla 32. Capacidad de inhibición del mucílago de fique filtrado	144
Tabla 33. Procedimiento de obtención de mucílago de fique y de melaza	146
Tabla 34. Sistemas de fluido - Prueba final BTT 1	149
Tabla 35. Sistemas de fluido - Prueba final BTT 2	151
Tabla 36. Sistemas de fluido - Prueba de dispersión	154
Tabla 37. Sistemas de fluido - Prueba de acreción	157
Tabla 38. Sistemas de fluido - Prueba de compatibilidad	158
Tabla 39. Sistemas de fluido - Prueba de exposición simplificada	159
Tabla 40. Resumen estadístico para la prueba BTT (Estudios de filtrado API)	161
Tabla 41. Análisis de varianza para los estudios de filtrado -ANOVA-	161
Tabla 42. Diferencias entre las medias para los estudios de filtrado API -Tukey-	162

Tabla 43. Medias, errores estándar e intervalos de confianza del 95% para los estudios de filtrado API	163
Tabla 44. Resumen estadístico para la prueba de dispersión	165
Tabla 45. Análisis de varianza para la prueba de dispersión -ANOVA-	166
Tabla 46. Diferencias entre las medias para la prueba de dispersión -Tukey-	167
Tabla 47. Medias, errores estándar e intervalos de confianza del 95% para la prueba de dispersión	168

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Esquema de clasificación de los filosilicatos	181
Anexo B. Formulación y estudio reológico de los sistemas de fluido en la prueba preliminar - 1	183
Anexo C. Formulación y estudio reológico de los sistemas de fluido en la prueba preliminar - 2	186
Anexo D. Formulación y estudio reológico de los sistemas de fluido en la prueba final BTT - 1	190
Anexo E. Formulación y estudio reológico de los sistemas de fluido en la prueba final BTT - 2	193
Anexo F. Formulación y estudio de filtrado API de los sistemas de fluido en la prueba final BTT	196
Anexo G. Formulaciones y resultados de la prueba de dispersión	198
Anexo H. Formulaciones y reología del lodo base a diferentes concentraciones de polímero	202
Anexo I. Formulaciones y resultados de la prueba de acreción	204
Anexo J. Formulaciones y reología de los sistemas de fluido para la prueba de compatibilidad	206

## NOMENCLATURA

### NOTACIÓN

AEC	Anion Exchange Capacity [meq/100 g]
C	Cohesión [Pa]
CEC	Cation Exchange Capacity [meq/100 g]
D	Coeficiente de difusión [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
DHS	Diferencia Honestamente Significativa.
F	Estadístico para probar una hipótesis del modelo.
IC	Intervalo de confianza.
ICS	Intervalo de confianza simultáneo.
k	Permeabilidad [D]
MBT	Prueba de azul de metileno /Methylene Blue Test/ [meq/100g]
P	Presión [Pa]
P	Probabilidad mínima de significación (valor mínimo de $\alpha$ ).
pH <sub>i</sub>	Indicador de pH inicial.
pH <sub>f</sub>	Indicador de pH final.
SEM	Scanning Electron Microscopy.
T	Temperatura [ $^{\circ}\text{F}$ ]
TEM	Transmission Electron Microscopy.
V <sub>a</sub>	Viscosidad aparente [cP]
V <sub>p</sub>	Viscosidad plástica [cP]
v/v	Porcentaje en volumen.
w/w	Porcentaje en peso.
Y <sub>p</sub>	Punto de cedencia /Yield Point/ [lb/100 ft <sup>2</sup> ]

## LETRAS GRIEGAS

$\sigma$	Esfuerzo [Pa]
$\tau$	Esfuerzo de cizalla [Pa]
$\tau$	Efecto producido por un tratamiento.
$\Phi$	Angulo de fricción [radianes]
$\emptyset$	Diámetro [mm]
$\varepsilon$	Error experimental aleatorio.
$\alpha$	Nivel de significación de una prueba.
$\mu$	Media global de las réplicas.

## SUBÍNDICES

1,2,... Se refiere a las diferentes réplicas y tratamientos.

eff Efectivo.

i Indicador de la dirección del esfuerzo (radial, tangencial, vertical).

i Número de réplicas en el diseño experimental.

j Número de tratamientos en el diseño experimental.

## RESUMEN

### TÍTULO:

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DEL MUCÍLAGO DE FIQUE COMO PRODUCTO ESTABILIZADOR DE ARCILLAS \***

### AUTORES:

Luis José Restán Caldera.

Gustavo Adolfo Ospina Hernández. \*\*

### PALABRAS CLAVES:

Lutitas, Mucílago de Fique, Estabilización de Arcillas, Embolamiento de la Broca, Prueba de Tolerancia a la Bentonita, Prueba de Dispersión, Prueba de Acreción, Diseño Experimental.

### DESCRIPCIÓN:

De la planta de fique solo es aprovechado un 4% (fibra) y el 96% restante se considera como desperdicio, puesto que se le ha dado muy poca aplicación, entre ellos el mucílago. El objetivo general de esta investigación es evaluar la capacidad del mucílago de fique como un producto estabilizador de arcillas, a partir de las respectivas pruebas de laboratorio (Tolerancia a la Bentonita, Dispersión y Acreción), teniendo en cuenta los estudios realizados previamente en el Laboratorio de Lodos y Cementos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos – UIS, acerca del uso de productos naturales (tales como el mucílago de fique) para aditivos de lodos de perforación como sustituto de productos comerciales nocivos al medio ambiente.

En el Capítulo 1, se presentan los conceptos fundamentales acerca de la mineralogía de las arcillas. En el Capítulo 2, se exponen los problemas relacionados con la inestabilidad de las lutitas y sus soluciones. El Capítulo 3, muestra la descripción de la planta de fique, taxonomía y sus características generales. En el Capítulo 4, se presenta el diseño experimental a través del cual se realizó esta investigación, al igual que los resultados de las pruebas de laboratorio y sus respectivos análisis.

Como resultado de las pruebas preliminares, se determinó que el mucílago de fique filtrado (FMB) y el mucílago de fique filtrado deshidratado (FMB-Plus) eran los de mejor desempeño, por lo tanto las pruebas finales se le realizaron a estos sub-productos comparándolos con el Cloruro de Potasio (KCl).

Finalmente, el FMB-Plus fue el sub-producto que más próximo desempeño tuvo, como supresor de hidratación y de dispersión, comparado con el KCl; mientras que como supresor de acreción, el mejor comportamiento lo tuvo el FMB.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ciencias Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Ing. Emiliano Ariza.

## SUMMARY

### TITLE:

**SOFTWARE FOR THE TEACHING OF THE HEAT TRANSFER \***

### AUTHORS:

Luis José Restán Caldera.

Gustavo Adolfo Ospina Hernández. \*\*

### KEY WORDS:

Shales, Fique Mucilage, Clay Stabilization, Bit Balling, Bentonite Tolerance Test, Dispersion Test, Accretion Test, Experimental Design.

### DESCRIPTION:

Only make use of the 4% (fiber) of the fique plant and 96% remaining is considered like waste, since it has been given very little application, mucilage among them. The general objective of this investigation is to evaluate the capacity of the fique mucilage as a clay stabilizer additive, starting from the respective laboratory tests (Bentonite Tolerance Test, Dispersion and Accretion), in keeping with the studies carried out previously at Muds and Cements Laboratory of Petroleum Engineering School – UIS, about the use of natural products (such as the fique mucilage) for drilling fluids like substitute of noxious commercial additives to the environment.

The fundamental concepts about clay mineralogy are presented in the Chapter 1. In the Chapter 2, the problems related with the shales instability and their solutions are exposed. The Chapter 3, shows fique plant description, taxonomy and their general characteristics. In the Chapter 4, the experimental design through which was perform this investigation is highlighted, the same as the laboratory tests results and its respective analyses.

As a result of the preliminary tests, it was determined that the fique mucilage filtered (FMB) and the dehydrated fique mucilage filtered (FMB-Plus) they were those of better acting, therefore the final tests were carried out to these sub-products comparing them with the Potassium Chloride (KCl).

Finally, the FMB-Plus was the sub-product which performed in similar way, as hydration and dispersion suppressant, compared with the KCl; while as accretion suppressant, the best behavior was for FMB.

---

\* Degree Work.

\*\* Physical-Chemical Sciences Faculty, Petroleum Engineering, Eng. Emiliano Ariza.

## INTRODUCCIÓN

El problema de la estabilidad de las lutitas ha mantenido inquietos a los ingenieros de petróleos con respecto a la perforación de pozos de aceite y gas. La inestabilidad de las lutitas, es de hecho el área de problema técnico más significativa en la perforación, con pérdida de tiempo y problema de costos.

La estabilidad de pozo es un problema menor cuando se perfora con lodos base aceite (OBM) y lodos sintéticos. Una vez el peso del lodo y la salinidad de la emulsión inversa se establecen apropiadamente, la estabilidad puede garantizarse en gran parte.

Actualmente la industria esta enfrentado muchos cambios técnicos y ambientales asociados con la perforación de pozos cada vez más difíciles, como los pozos horizontales multilaterales y de alcance extendido y el reemplazamiento de los OBM's que son técnicamente superiores pero contaminantes.

Por diversas razones, entre ellas, económicas, por conveniencia y logísticas, ha sido siempre más factible perforar con lodos base agua (WBM). Sin embargo, los sistemas de lodo base agua convencionales han mostrado un pobre desempeño en ciertos ambientes de perforación, particularmente en formaciones de lutitas sensitivas al agua que pueden producir hinchamiento y/o desintegración de la lutita, causando problemas durante la perforación y con altos costos. En general, los lodos base agua pueden generar bajas tasas de penetración /ROP/, embolamiento de la broca /Bit Balling/,

embolamiento de los estabilizadores /Stabilizer Balling/, baja lubricidad, alto torque, pega de tubería /Stuck Pipe/, mala calidad de la torta y baja estabilidad térmica.

La búsqueda de sistemas de WBM's altamente inhibidos con desempeño similar a los OBM's, ha sido un continuo esfuerzo en la industria de fluidos de perforación; gracias a las nuevas y sofisticadas técnicas de pruebas de laboratorio en lutitas, que han llevado a un mejor entendimiento de la inestabilidad de este tipo de formaciones, ha permitido una acertada aproximación en el diseño y aplicación de los fluidos de perforación base agua para perforar lutitas.

Estos fluidos de alto desempeño, con aditivos tales como supresores de hidratación, supresores de dispersión, supresores de acreción, entre otros, aún demandan por nuevos productos menos costosos y más biodegradables, por lo cual es importante la realización de investigaciones como la que se planteó en este proyecto. El uso del mucílago del fique como estabilizador de arcillas muestra muy buen comportamiento comparado con el inhibidor comercial más utilizado en los fluidos de perforación, como se presenta en los resultados de la experimentación.

Millones de toneladas de residuos agrícolas o subproductos de la cosecha son desperdiciados en el mundo. Se estima que estos ascienden a 100 mil millones de toneladas al año. En Colombia se generan alrededor de 22 millones de toneladas al año, representados en bagazo de caña, tallos de algodón, tuzas de mazorca, bagazo de fique, pulpa de café, cascarilla de arroz, etc.; de estos solo unos pocos son reutilizados por algunas industrias nacionales tales como la papelera, las de alimentación animal, las de compostaje y la industria de la

caña de azúcar. En general, el aprovechamiento de residuos agrícolas ha sido pobre en el país.

Uno de los cultivos que en algún momento fue representativo en la economía del departamento de Santander y sus alrededores fue el de fique, el cual últimamente se ha intentado tecnificar con el fin de recuperar este sector ante el reciente auge de las fibras sintéticas, además de reconciliar al campesino con esta actividad pues muchas veces ellos mismos ven esta actividad poco viable debido a la alta cantidad de residuos generados y a la baja rentabilidad. De la planta de fique solo es aprovechado un 4% (fibra) y el 96% se considera como desperdicio, puesto que se le ha dado muy poca aplicación, entre ellos el mucílago.

Teniendo en cuenta los estudios realizados previamente en el Laboratorio de Lodos y Cementos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos - Universidad Industrial de Santander, acerca del uso de productos naturales (mucílagos, tales como el fique) para aditivos de lodos de perforación como sustituto de productos comerciales nocivos al medio ambiente, surge la necesidad de profundizar el tema en la búsqueda de alcanzar los objetivos del proyecto.

El objetivo general de esta investigación es evaluar la capacidad del mucílago de fique como un producto estabilizador de arcillas, a partir de las pruebas de laboratorio respectivas.

Las pruebas preliminares se desarrollaron en el Laboratorio de Lodos y Cementos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos y para las pruebas especializadas se contó con el respaldo y orientación del Instituto

Colombiano del Petróleo (ICP), principal centro de investigación para Colombia en el campo petrolero.

El Capítulo 1 tiene como fin presentar los conceptos fundamentales acerca de la mineralogía de las arcillas, las cuales son componentes básicos de las lutitas, así como también los principios del comportamiento de las lutitas y el transporte en estas.

En el Capítulo 2, se exponen los problemas relacionados con la estabilidad de las lutitas (desintegración de ripios, inestabilidad de las paredes del pozo y embolamiento de la broca) y sus soluciones. Por otro lado se presenta la capacidad de estabilización de los diferentes aditivos utilizados en la industria y la eficacia de estos en los sistemas de fluidos de perforación, los cuales han sido clasificados en base al efecto de estos sistemas de lodo sobre el Contenido de Agua (WC), la Presión de Hinchamiento (SP) y la Presión de Poro (PP) de las lutitas. También se realiza una descripción de la tecnología de lodos aplicada a la evaluación de estabilizadores de arcilla.

El Capítulo 3 muestra la descripción de la planta de fique, taxonomía y sus características generales. Los antecedentes históricos del mucílago que se obtiene de esta planta también son discutidos, así como el método de recolección y conservación utilizado para desarrollar esta investigación.

El Capítulo 4 muestra el diseño del proceso experimental, el cual involucra el reconocimiento y formulación del problema, la selección de los factores que pueden influir en el experimento y sus niveles, la selección de las variables respuesta, así como también, la adquisición y análisis estadísticos de los resultados alcanzados, para fundamentar esta investigación.

Finalmente, en el Capítulo 5 y 6 se presentan las respectivas conclusiones y recomendaciones.

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS LUTITAS

Las lutitas son rocas que pueden incluir tanto limolitas altamente cementadas como lutitas débiles tipo gumbo que se componen principalmente de arcillas hidratables. Las principales diferencias en el comportamiento de las lutitas puede ser atribuido a estas diferencias en composición, por lo que se define a las lutitas como rocas de baja permeabilidad donde la matriz consiste, por lo menos parcialmente, de arcilla<sup>10</sup>.

### 1.1 COMPOSICIÓN DE LAS LUTITAS

Las lutitas son rocas que han sido formadas por la compactación de sedimentos marinos. El agua es presionada fuera de las rocas cuando los sedimentos están muy profundos, y el incremento en temperatura con la profundidad favorece el proceso de deshidratación. La apariencia y el comportamiento de las lutitas es infinitamente variado, pero una característica que es común a todas las lutitas es que ellas contienen arcillas. Es por esto, que es apropiado que las lutitas sean llamadas arcillolitas /claystones/, lodolitas /mudstones/ y rocas arcillosas.<sup>29</sup>

En la Tabla 1, se presenta la composición típica para las lutitas y arcillas en la que se observa gran similitud.

Se observa un alto contenido de aluminio de ambas arcillas no expandibles, alto contenido de potasio en la illita, un alto contenido de magnesio de la clorita y el relativamente alto contenido de agua de las esmectitas.

**Tabla 1**  
**Composiciones Típicas - Lutitas y Arcillas**

Componente, %	Lutitas	ARCILLAS EXPANDIBLES (Esmectitas)		ARCILLAS NO EXPANDIBLES	
		Montmorillonita	Nontronita	Illita	Clorita
SiO <sub>2</sub>	58,1	51,47	42,99	49,12	49,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,4	19,55	7,70	20,58	20,26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,02	2,77	26,56	8,54	2,35
FeO	2,45	0,19	0,17	1,83	16,92
MgO	2,44	3,73	0,06	3,68	22,06
CaO	3,11	1,74	1,92	0,65	0,75
Na <sub>2</sub> O	1,3	0,58	0,04	0,5	-
K <sub>2</sub> O	3,24	0,27	0,06	5,94	-
TiO <sub>2</sub>	-	0,11	0,21	0,87	-
H <sub>2</sub> O	5,00	17,31	19,52	8,06	11,36
Otro	2,31	2,28	0,90	0,23	0,31
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

**Fuente:** Manual of Drilling Fluids Technology, NL Baroid. 1979.

Es conveniente clasificar las lutitas problema de acuerdo a la cantidad de arcilla sensible al agua que ellas contengan. Estas arcillas incluyen montmorillonita, la cual exhibe gran cantidad de dispersión e hinchamiento; illita, que se hincha y se dispersa a un menor grado; y las arcillas inter laminares que están compuestas de inter estratificaciones al azar de illitas y montmorillonitas. La tendencia a la dispersión es más alta para estas arcillas debido a que la estratificación intermitente reduce el número de enlaces fuertes entre las partículas. Puesto que una porción de la estructura se hidrata a un grado más alto que la otra, un hinchamiento no uniforme toma lugar diferente al caso de la montmorillonita o illita pura. Estas diferencias en el hinchamiento y aumento de los esfuerzos de hidratación tienden a debilitar la estructura. En la categorización, es también útil incluir fracciones de clorita ya que estas arcillas, mientras solo se expanden levemente y son relativamente no dispersables, alteran completamente el comportamiento de la lutita. Tal

esquema de clasificación ayuda en la discusión sobre el mejor tipo de fluido a emplear en un caso dado.

La clasificación de lutitas encontradas en la práctica de perforación es presentada en la Tabla 2. Las cinco clases son basadas en una combinación del contenido de arcilla total e individual, firmeza, características de la matriz, MBT y tendencia a la hidratación y dispersión.

**Lutitas Clase 1:** Incluye aquellas lutitas blandas que tienen un alto contenido de montmorillonita, con algo de illita incluida. Una gran tendencia hacia el hinchamiento y a la dispersión es encontrada. La mayoría de lutitas designadas como lutitas “gumbo”, especialmente aquellas con altas tendencias adhesivas y cohesivas están dentro de esta clase.

**Lutitas Clase 2:** Incluye otras lutitas blandas con un alto contenido de illita y montmorillonita. El contenido total de arcilla en tales lutitas es extremadamente alto y con alta tendencia al hinchamiento. La dispersión es menor que en la primera clase debido a la presencia de fracciones de clorita. La lutita Vermilion de Louisiana es un ejemplo de este tipo. El personal de perforación a menudo se refiere a las lutitas de estas primeras dos clases como lutitas blandas y que hacen lodo.

**Lutitas Clase 3:** Incluye lutitas medianamente duras como la Atoka y la Midway, las cuales son notadas por su tendencia a derrumbarse /sloughing/. Estos materiales exhiben un alto grado de hinchamiento pero solo un nivel medio de dispersión. Tanto las fracciones de illita como de arcilla interestratificada constituyen un porcentaje significativo del peso de las lutitas.

Tabla 2

Clasificación de las Lutitas Problema debido al Contenido de Arcilla

Clase	Tipo de Lutita	Problemas Típicos	MBT* (meq/100g)	Contenido de Agua (% w/w)	Tipos de Arcillas
1	<b>Blanda</b>	Estrechamiento del hueco. Ensanchamiento del hueco. Embolamiento de la broca. Anillos de lodo.	20 - 40	25 - 70	Alta en montmorillonita y algo de illita
2	<b>Blanda</b>	Estrechamiento del hueco. Washout debido a un mayor grado de dispersión. Embolamiento de la broca. Formación de cavernas.	10 - 20	15 - 25	Alta en montmorillonita pero mayor contenido de illita
3	<b>Medianamente Dura</b>	Dispersión moderada y tendencia a derrumbamiento.	10 - 20	2 - 10	Alta en arcillas interestratificadas e illita, y algo de clorita
4	<b>Dura</b>	Poca dispersión e hinchamiento y tendencia a derrumbamiento. Formación de cavernas. Estrechamiento del hueco debido a esfuerzos de sobrecarga.	3 - 10	5 - 15	Contenido moderado de illita y clorita
5	<b>Muy Dura y Quebradiza</b>	No hay dispersión significativa. Formación de cavernas. Colapso del pozo.	0 - 3	2 - 5	Alta en illita y moderada en caolinita y clorita

\* **MBT:** Methylene Blue Test - Medida de la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas; el MBT es proporcional al contenido de esmectita.

Fuente: Chenevert, M. et al.: Stabilizing Sensitive Shales with K-Based Drilling Fluids. 1973.

Cantidades apreciables de clorita están presentes, pero cantidades continuas de montmorillonita usualmente no están presentes.

**Lutitas Clase 4:** Son una lutitas duras propensas al derrumbamiento. La illita y clorita normalmente componen la fracción total de arcilla y esta fracción es solo alrededor del 20% del peso total de la lutita. Esta variedad muestra poca dispersión de agua. Aunque el contenido de arcilla es bajo (limitado a illita y clorita solamente) y el hinchamiento total resultante es bajo, cualquier cantidad de hidratación es suficiente para ser que la formación sea inestable. Las presiones de hinchamiento diferencial, las cuales resultan cuando una pequeña cantidad de arcilla esta circundada por una matriz de feldespato y cuarzo completamente no hinchable, son a menudo culpables de tal inestabilidad.

**Lutitas Clase 5:** Incluye las lutitas muy duras y quebradizas, algunas de las cuales tienen matrices con numerosas micro fracturas; presentan muy poca o dispersión al contacto con el agua. El contenido total de illita es bastante alto, y hay algo de clorita presente. Las formaciones de este tipo son reconocidas por tener tendencias a la formación de cavernas /cavings/. El hinchamiento es limitado pero puede ser acelerado debido a la invasión de agua a lo largo de las micro-fracturas. Típicamente, grandes fragmentos de tales formaciones son empujadas dentro del pozo para aliviar la presión.

Esta división esquemática de los tipos de lutita ayuda en la interpretación y categorización de los resultados de las pruebas de laboratorio en muestras de formación. Una vez que la composición y características de la lutita son determinadas, los efectos de varios fluidos de perforación inhibidos sobre su

tendencia al hinchamiento y dispersión pueden ser explicados sobre la base de mineralogía de las arcillas.

En las clases 3, 4 y 5 generalmente se incluyen las llamadas lutitas duras. Las clases 3 y 4 incluyen la mayoría de lutitas que causan los más serios problemas en los pozos.

En la Tabla 3 se presentan las Lutitas Problemáticas más conocidas con sus contenidos de arcillas.

**Tabla 3**  
**Ejemplos de Lutitas Problemáticas**

CONTENIDO DE ARCILLA MINERAL (% w/w)					
Lutita	Clase	Montmorillonita	Illita	Ínterestratificada	Clorita
Anahuac	1	40,4	5,5	-	-
Vermilion	2	25,4	42,0	-	6,7
Atoka	3	-	38,8	18,1	13,0
Midway	3	-	35,0	15,0	15,0
Wolfcamp	4	-	14,8	-	3,2
Hard Shale	5	-	48,3	-	8,3

**Fuente:** Chenevert, M. et al.: Stabilizing Sensitive Shales with K-Based Drilling Fluids. 1973.

Las edades geológicas de las lutitas listadas son señaladas como sigue:

Anahuac (muy temprano en el Mioceno).....Cerca de 25 millones de años,

Midway (Paleoceno).....Cerca de 60 millones de años,

Wolfcamp (Permiano temprano).....Cerca de 275 millones de años,

Atoka (Carbonífero medio).....Cerca de 310 millones de años.

Investigaciones han demostrado una tendencia aparente de la montmorillonita (arcilla expandible) hacia la illita y la clorita (arcillas no expandibles) con la edad.

Las lutitas son serios contaminantes para los fluidos de perforación porque ellas contienen arcillas. Las arcillas están usualmente presentes en los lodos de perforación, ya sea adicionadas intencionalmente para acondicionar el lodo, o incorporadas al lodo como sólidos perforados de los ripios de la lutita. Dado que las arcillas son constituyentes de tanto el fluido de perforación y la roca que es perforada, es fundamental el entendimiento de la naturaleza y el comportamiento de los minerales de arcilla para el control del lodo y la tecnología de perforación.

## **1.2 MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS**

**1.2.1 Nomenclatura de las Arcillas.**<sup>29</sup> Las clases y nombres de los minerales de arcillas que están presentes en las lutitas que son perforadas se pueden clasificar en arcillas expandibles (hinchables) y arcillas no expandibles (no hinchables), como se muestra en la Tabla 4. Una clasificación más completa se presenta en el Anexo A.

Las arcillas expandibles pueden adsorber grandes volúmenes de agua (especialmente agua dulce) y subdividirse en partículas más pequeñas durante el proceso de hidratación. Las arcillas no expandibles adsorben substancialmente menos agua.

**Tabla 4**

**Nomenclatura de los Minerales Arcillosos**

ARCILLAS EXPANDIBLES		ARCILLAS NO EXPANDIBLES
Esmectitas	Vermiculita	Illita, Clorita, Caolinita.
Montmorillonita, Saponita, Hectorita, Beidelita.	Arcillas de carga más alta que las de la esmectita.	

**Fuente:** Manual of Drilling Fluids Technology, NL Baroid. 1979.

**1.2.2 Principios Estructurales.**<sup>44</sup> Los minerales arcillosos pertenecen a los filosilicatos. Los principales elementos que constituyen los minerales arcillosos son arreglos bidimensionales de tetraedros de Sílice-Oxígeno y arreglos bidimensionales de octaedros de Aluminio- o Magnesio- Oxígeno-Hidroxilo. En la mayoría de los minerales arcillosos, tales capas de tetraedros y de octaedros son superpuestos en diferentes formas. (Ver Tabla 5 para términos estructurales en diferentes idiomas.)

**Tabla 5**

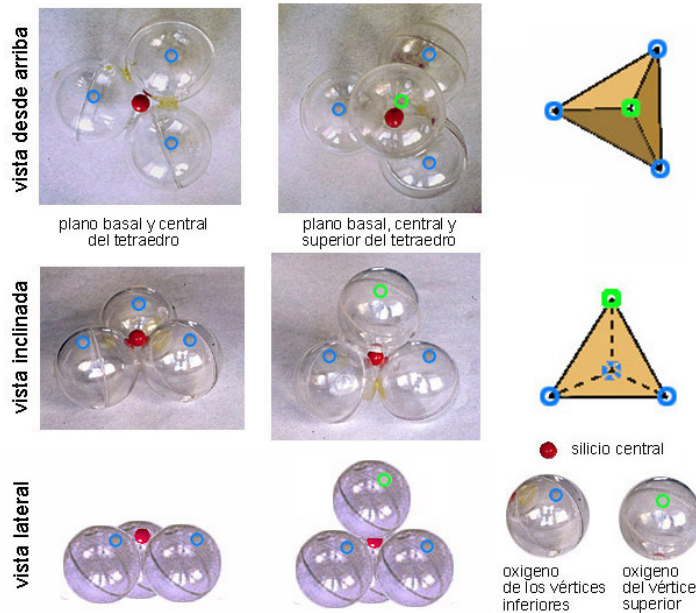
**Términos de Referencia y sus Equivalencias en Diferentes Lenguajes**

Inglés	Francés	Español
Plane	Plan	Plano
Sheet	Couche	Capa
Layer	Feuillet	Lámina o paquete de capas
Interlayer or interlayer materials	Espace Interfoltaire	Material íter laminar o íter estratificado
Unit structure	Unité structurale	Unidad estructural

**Fuente:** van Olphen: Clay Colloid Chemistry. 1977.

**1.2.2.1 Unidades Estructurales.**<sup>15</sup> Los filosilicatos, como todos los demás grupos de silicatos, están constituidos por una unidad estructural Si-O que es un tetraedro de coordinación con el Si en el centro y cuatro oxígenos en cada uno de los vértices del tetraedro. Los tetraedros son pirámides de base

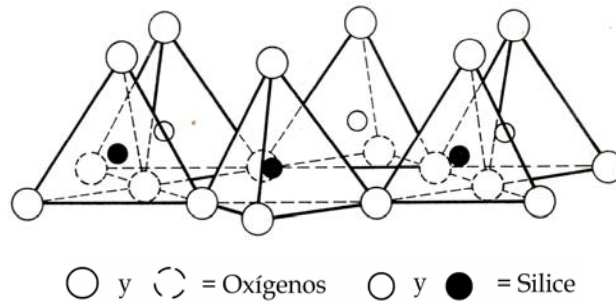
triangular, con todas sus caras iguales (cuatro triángulos equiláteros), como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Estructura tetraédrica** (www.edafologia.com)

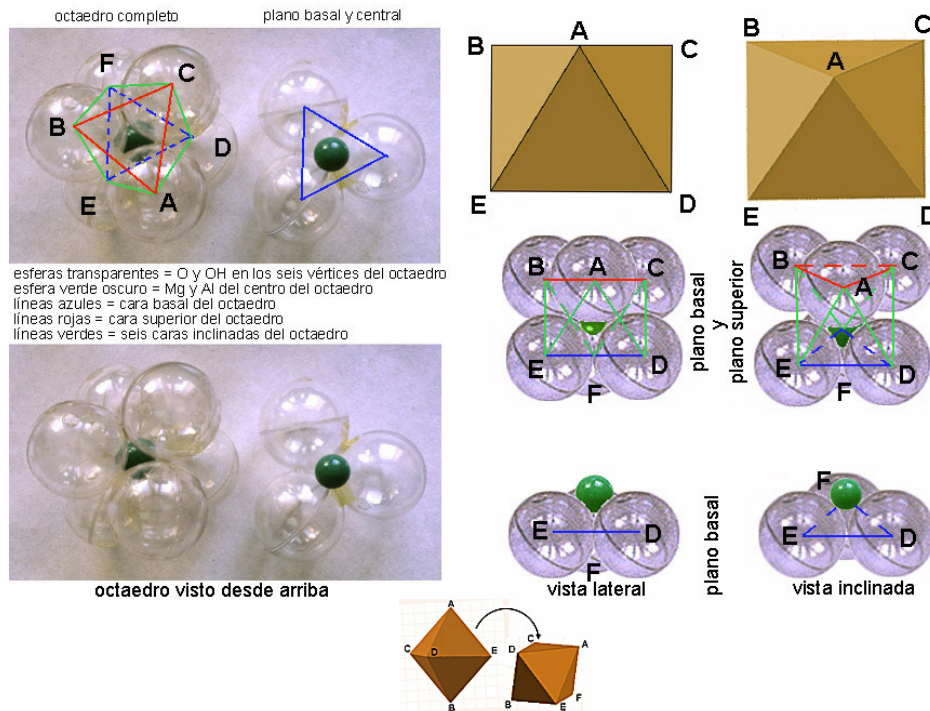
El tetraedro Si-O se encuentra eléctricamente descompensado (el Si aporta cuatro cargas positivas frente a la ocho negativas de los cuatro oxígenos de los vértices), por lo que ha de unirse a otros cationes para neutralizar las cargas. En estas estructuras cada vértice del plano basal pertenece a dos tetraedros vecinos (cada oxígeno se coordina a dos silicios), dando una capa de tetraedros (Figura 2).

Los tetraedros, en el caso de los filosilicatos, comparten su vértice superior con un octaedro de coordinación, con Al y/o Mg en el centro y O y/o OH en los seis vértices. Los octaedros son bipirámides con su plano ecuatorial cuadrado y todas sus caras triángulos equiláteros iguales (Figura 3).



**Figura 2. Capa de tetraedros dispuestos en red hexagonal (Grim, 1968)**

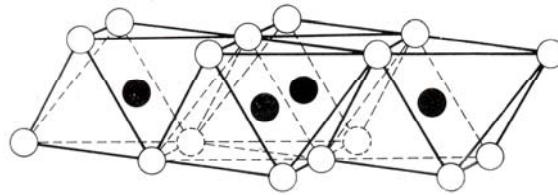
Los octaedros en estas estructuras se disponen apoyados en una de sus caras.



**Figura 3. Estructura octaédrica (www.edafologia.com)**

Estos octaedros se encuentran también descompensados eléctricamente (dos cargas positivas si el catión octaédrico es el Mg o tres si se trata de Al, frente a las 12 posibles cargas negativas que pueden aportar los seis vértices). Para neutralizarse se comparten entre sí sus vértices formando una capa de

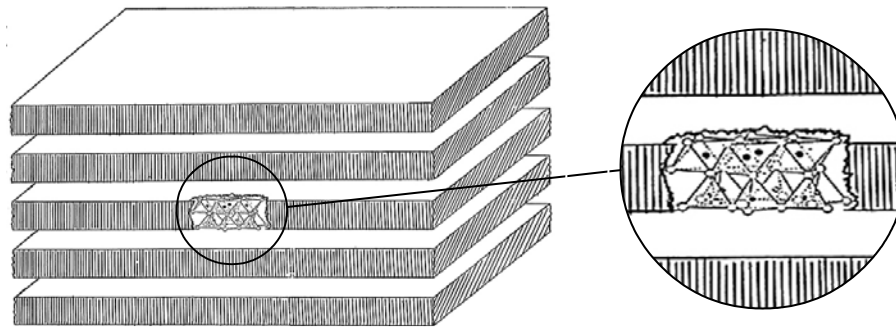
octaedros (además se unirán a los silicios de la capa tetraédrica) como se muestra en la Figura 4.



○ y ◌ = Hidroxilos      ● = Aluminios, Magnesios, etc.

**Figura 4. Capa de unidades octaédricas (Grim, 1968)**

Las capas de tetraedros y octaedros se acoplan dando láminas o estratos (arreglos 1:1, 2:1, etc.) que al repetirse forma la estructura cristalina (Figura 5).



**Figura 5. Estructura cristalina y arreglo de capas (www.edafologia.com)**

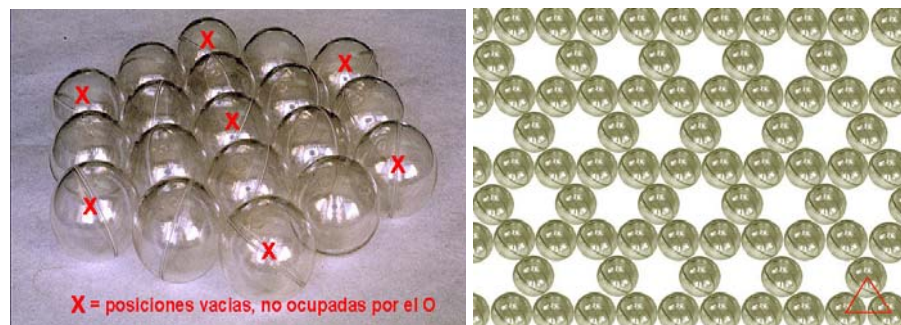
**1.2.2.2 Capa Tetraédrica.**<sup>15</sup> Esta compleja estructura cristalina se puede comprender de una manera sencilla considerándola como un conjunto de átomos dispuestos en planos paralelos, que podemos suponer horizontales. En estos planos los átomos tendrán siempre simetría hexagonal, o más precisamente ditrigonal. Estos planos son (por ejemplo desde abajo hacia arriba):

- **Plano 1. Plano basal de los tetraedros.** Está formado por un conjunto de átomos de O, como se muestra en las Figuras 6 y 7.



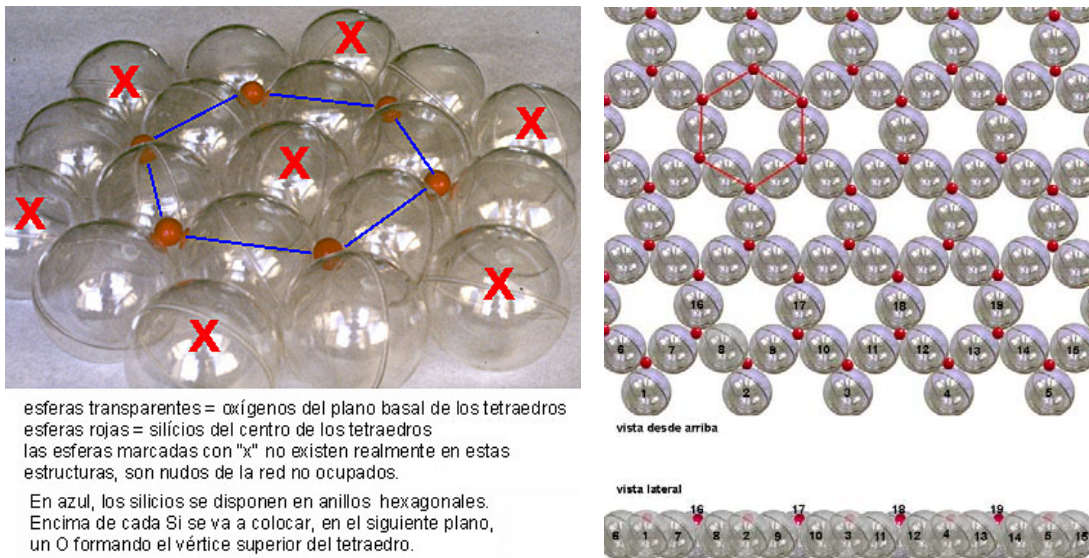
**Figura 6. Empaquetamiento hexagonal** ([www.edafologia.com](http://www.edafologia.com))

En la red hexagonal (seguiremos llamándola hexagonal, para simplificar, aunque ya sabemos que en realidad es ditrigonal) aparecerán huecos (posiciones no ocupadas por O) por exceso de cargas negativas (gobernadas por los cationes que se sitúan en el plano inmediatamente superior).



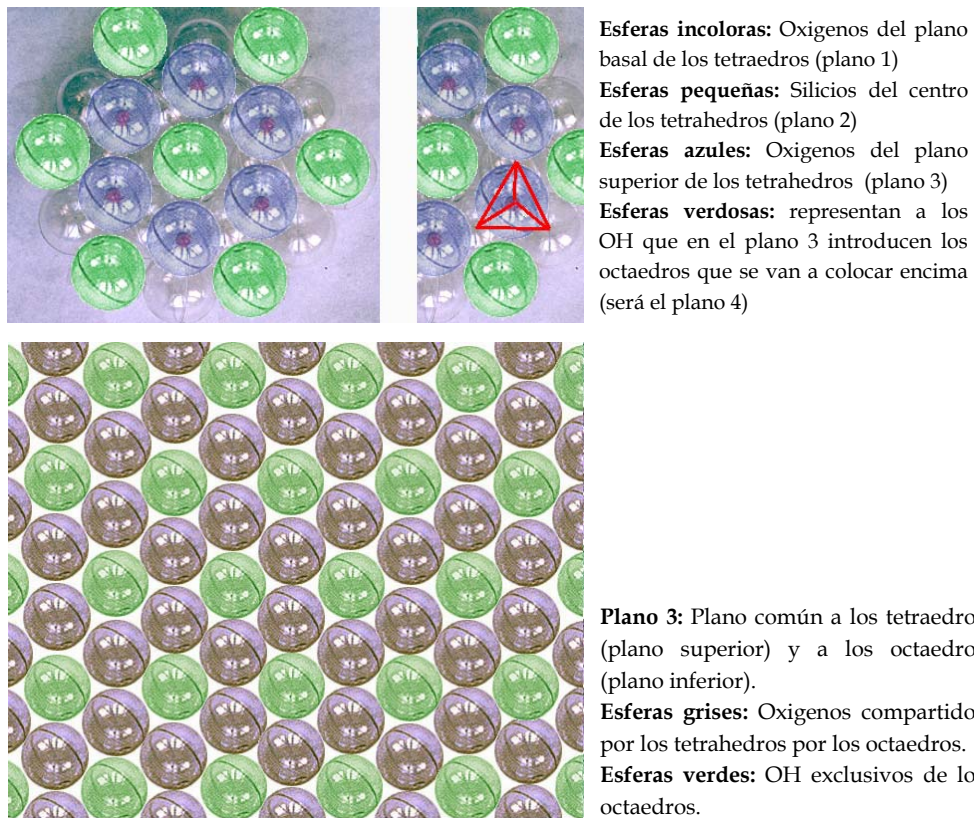
**Figura 7. Red hexagonal del plano basal** ([www.edafologia.com](http://www.edafologia.com))

- **Plano 2. Plano de los cationes de Si del centro de los tetraedros.** Se colocan en el hueco que dejan cada tres O. Se disponen formando también una malla de anillos hexagonales (Figura 8).



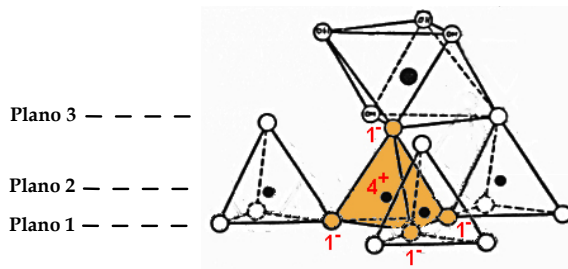
**Figura 8. Plano de los cationes de Si** (www.edafologia.com)

- **Plano 3. Plano de O y de OH compartidos por tetraedros y octaedros.**  
 Los O se sitúan justo encima de los Si, del plano 2, terminando de ocupar el hueco que dejan los O del plano basal (plano 1). Estos tres planos forman la capa tetraédrica. Los O del plano 3 ocupan el vértice superior de los tetraedros y se unen a un Mg y/o Al octaédrico formando parte del plano inferior de los octaedros. Algunos de los vértices de este plano basal de los octaedros no tienen debajo ningún Si tetraédrico por lo que para compensar su carga se une a un H formando un grupo OH. Por tanto los iones que componen este plano se comparten entre los tetraedros y los octaedros (es a su vez el plano superior de los tetraedros y el inferior de los octaedros). Los O de este plano quedan coordinados por abajo al Si de la capa tetraédrica y por arriba al Mg/Al de la capa octaédrica (Figura 9).



**Figura 9. Plano de O y OH compartidos** (www.edafologia.com)

En este plano se encuentran ocupados todos los nudos de la red hexagonal. Los tetraedros de este plano 3 son eléctricamente neutros (Figura 10).



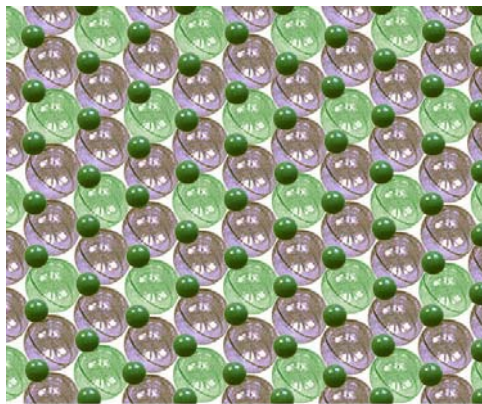
**Figura 10. Distribución de cargas en los tetraedros** (www.edafologia.com)

Efectivamente, en el interior el Si aporta 4 cargas positivas y los oxígenos, al compartirse con otros tetraedros (plano basal) y octaedros

(plano superior), aportan sólo una de sus dos cargas, con lo que tendremos en los vértices 4 cargas negativas.

### 1.2.2.3 Capas Octaédricas.<sup>15</sup>

- **Plano 4. Plano central de los octaedros** (que en estas estructuras se consideran apoyados sobre una de sus caras, con su eje principal, eje cuaternario, inclinado). Está constituido por los Mg o Al que se sitúan en los huecos que dejan cada tres O y/o OH del plano 3. Si se trata de Mg se ocupan todas las posiciones, pero si el catión octaédrico es el Al, por su mayor carga (+++ frente a las ++ del Mg) quedan posiciones vacías en la red. Se ocupan, concretamente dos de cada tres posibles y a esa capa se le llama dioctaédrica o *capa de gibbsita*. A la capa magnésica se le llama trioctaédrica o *capa de brucita*, al ocuparse tres nudos de cada tres posibles. Al igual que en el resto de los planos de estas estructuras los Mg y Al se distribuyen en redes hexagonales (Figuras 11 y 12).



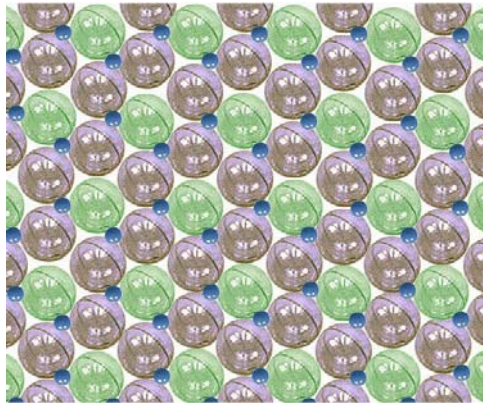
**Esferas grises:** O compartidos por los tetraedros y octaedros.

**Esferas verdes:** OH exclusivos de los octaedros.

Estas esferas transparentes forman el plano común (plano 3) a los tetraedros (por debajo) y a los octaedros (por encima).

**Puntos verdes opacos:** Se encuentran en un plano superior y representan a los Mg del centro de los octaedros, al ocuparse todas las posibles posiciones octaédricas se trata de una capa trioctaédrica (plano 4).

**Figura 11. Capa central trioctaédrica** (www.edafologia.com)



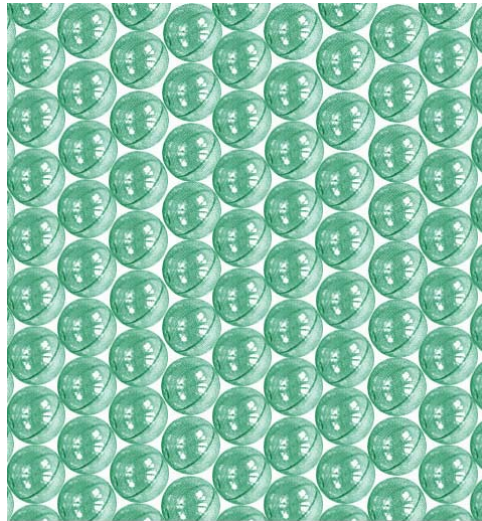
**Esferas grises:** O compartidos por los tetraedros y octaedros.

**Esferas verdes:** OH exclusivos de los octaedros. Estas esferas transparentes forman el plano común (plano 3) a los tetraedros (por debajo) y a los octaedros (por encima).

**Puntos azules opacos:** Se encuentran en un plano superior y representan a los Al del centro de los octaedros, al ocuparse sólo dos de las tres posiciones octaédricas se trata de un plano dioctaédrica (plano 4).

**Figura 12. Capa central dioctaédrica (www.edafologia.com)**

- **Plano 5. Plano superior de los octaedros.** Constituido por O y OH formando la cara superior de los octaedros. Plano compacto, con todos los nudos de la red hexagonal ocupados (ver Figura 6).



**Plano 5:** Vista desde arriba del plano superior de los octaedros, que en una estructura 1:1 está formado por un empaquetamiento hexagonal con todos los nudos de la red ocupados por OH.

Si la estructura fuese de tipo 2:1, los OH alternarían con O, al continuar la estructura, hacia arriba, con una nueva capa de tetraedros Si-O (como la de los planos 1 y 2, pero puesta ahora boca abajo).

**Figura 13. Capa superior de los octaedros (www.edafologia.com)**

Como ocurría con las capas tetraédricas, las octaédricas también son eléctricamente neutras. De las dos cargas de los oxígenos de los vértices sólo una se comparte con el catión octaédrico (Mg o Al), la otra carga se comparte con el silicio tetraédrico de la capa inferior y si no se une a este catión en ese

vértice en vez de haber un oxígeno hay un grupo OH (por tanto con sólo una carga negativa). Si el catión octaédrico es el Mg (++) los vértices del octaedro deben proporcionar un total de dos cargas negativas y para ello cada vértice se comparte entre tres Mg (pertenece a tres octaedros), de esta manera cada vértice aporta un tercio de carga y como hay seis vértices tendremos un total de dos cargas negativas por octaedro. En el caso del Al (+++) se necesitan tres cargas negativas en el octaedro y para ello ahora los vértices se comparten entre sólo dos octaedros (cada vértice aporta 1/2 de carga y como hay seis, pues  $6 \times 1/2 = 3$ ), como se ve en la Figura 14.

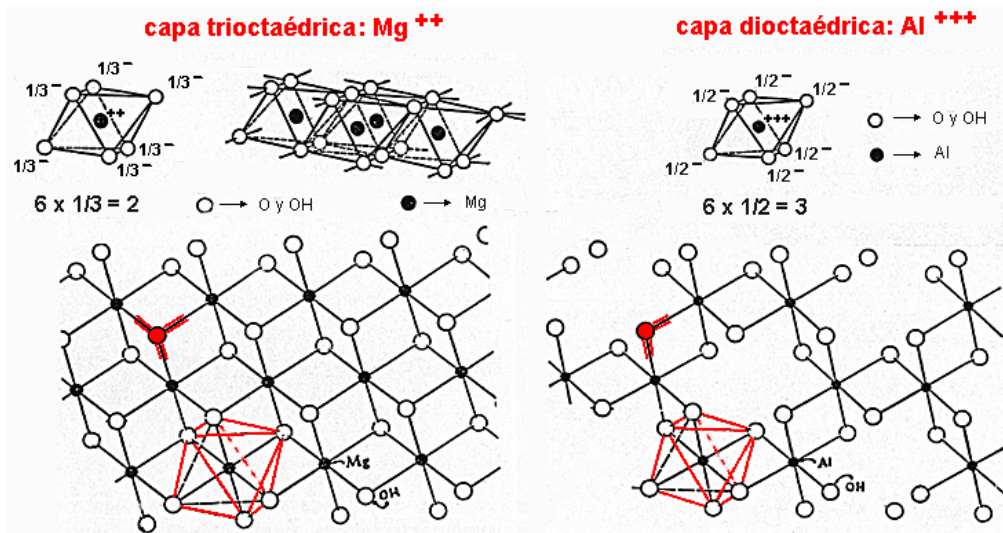
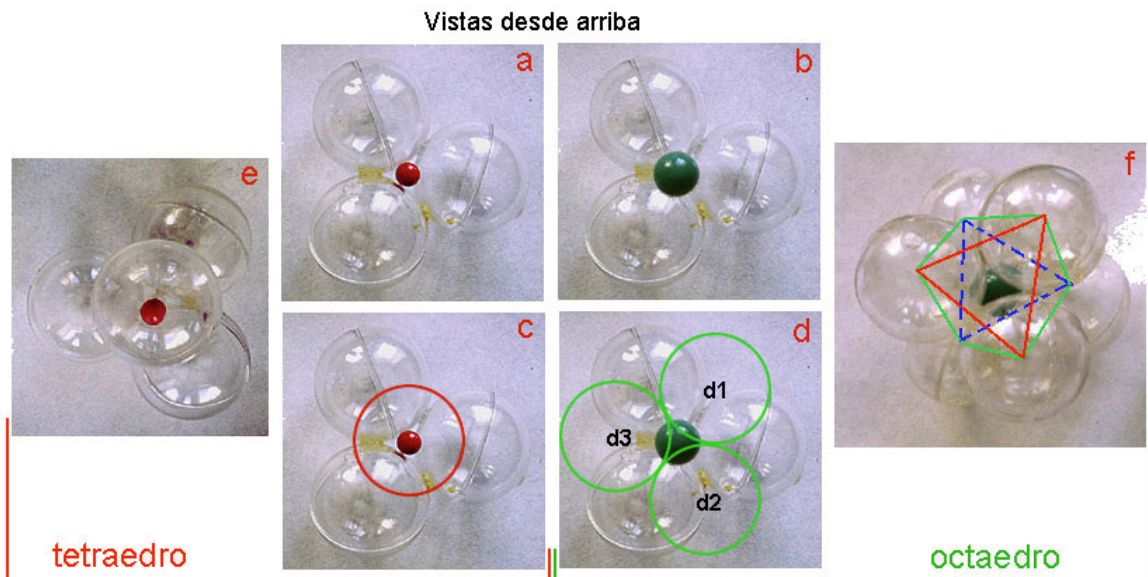


Figura 14. Distribución de cargas en los octaedros (www.edafologia.com)

**1.2.2.4 Capas Tetraédricas frente a las Octaédricas.**<sup>15</sup> La disposición de los iones en tetraedros y octaedros parece algo complicado, pero en la realidad es el simple resultado de un empaquetamiento de esferas iguales en tres planos ocupando el mínimo espacio (Figura 15). Por tanto para obtener un plano de simetría hexagonal basta con introducir bolas iguales en un recipiente plano y apretarlas (al moverlas ellas mismas se acoplan en una simetría hexagonal).



El plano basal del tetraedro y del octaedro son similares (figuras a y b), tres O y/o OH en los vértices de un triángulo equilátero. Encima se coloca el catión tetraédrico (caso del Si) u octaédrico (caso del Mg o Al). El tetraedro y el octaedro se forman al colocarse los O y/o OH del tercer plano. Estos se sitúan siempre en los huecos que dejan los O y/o OH del plano basal, pero un simple desplazamiento va a configurar el tetraedro o el octaedro de coordinación.

Si el cuarto O del plano superior se coloca justo encima del catión (en este caso Si; figura c) se forma el tetraedro. Pero si se coloca desplazado, en la posición d1 de la figura d, el poliedro se cierra al colocarse otros O y/o OH en las posiciones similares d2 y d3, apareciendo, así, un octaedro de coordinación. El hueco central que dejan los cuatro iones del tetraedro (figura e) es menor que el que dejan los seis iones del octaedro (figura f). El pequeño tamaño del Si lo hace ideal para entrar en una estructura tetraédrica mientras que el mayor tamaño de Al y, especialmente del Mg, es idóneo para las redes octaédricas.

**Figura 15. Estructuras tetraédrica y octaédrica (www.edafologia.com)**

Apilando planos de esferas de simetría hexagonal se origina la estructura. Al plano basal (con huecos, formando anillos hexagonales) se le acopla otro plano compacto (con todos los nudos de red ocupados). Ambos planos se encuentran ligeramente desplazados y girados 60 grados, para que los átomos se acoplen en los huecos. Estos planos están constituidos por aniones de O y OH y se unen por los cationes coordinantes que se sitúan en un plano intermedio y según donde se coloquen aparece la coordinación tetraédrica o la octaédrica (Figura 16).

En la naturaleza es frecuente que los dos primeros planos de aniones O y/o OH queden unidos por un catión tetraédrico, como es el caso del Si, y encima

se sitúe otro plano de OH con un plano intermedio de cationes octaédricos (de Mg o de Al) que los une.

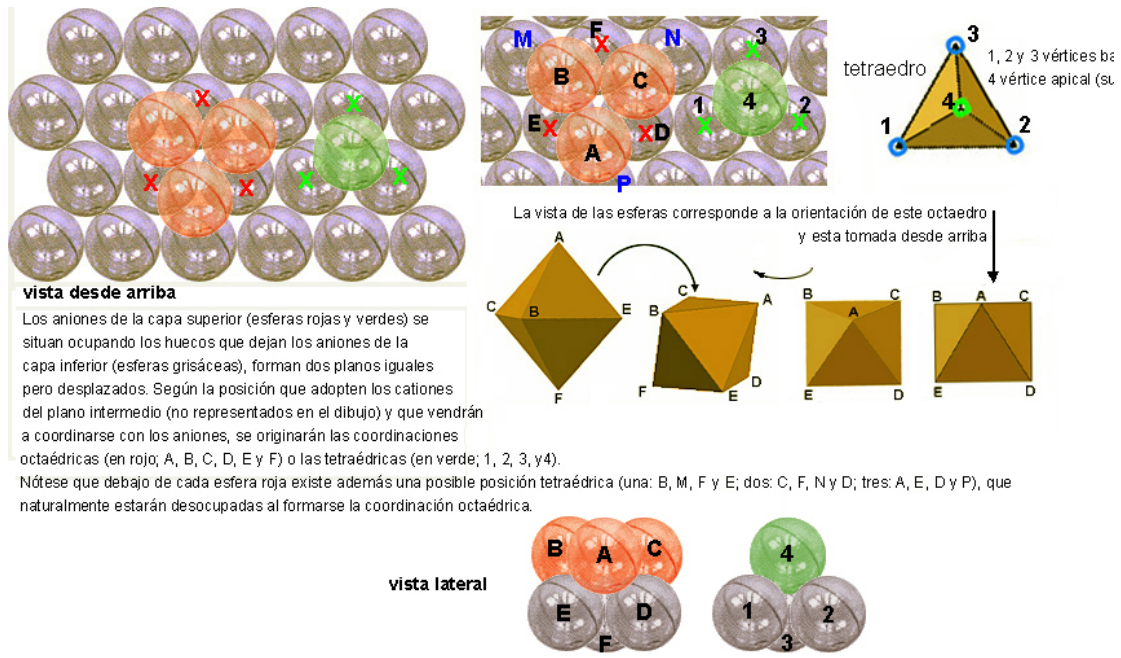


Figura 16. Coordinación tetraédrica y octaédrica (www.edafologia.com)

1.2.2.5 Estructuras Finales.<sup>15</sup>

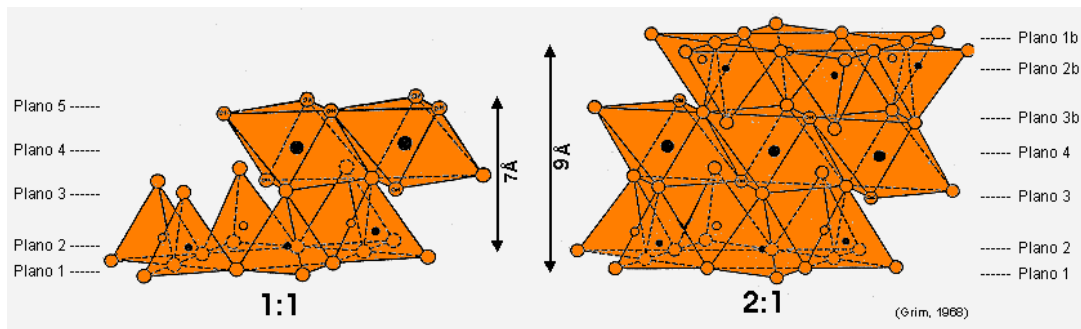
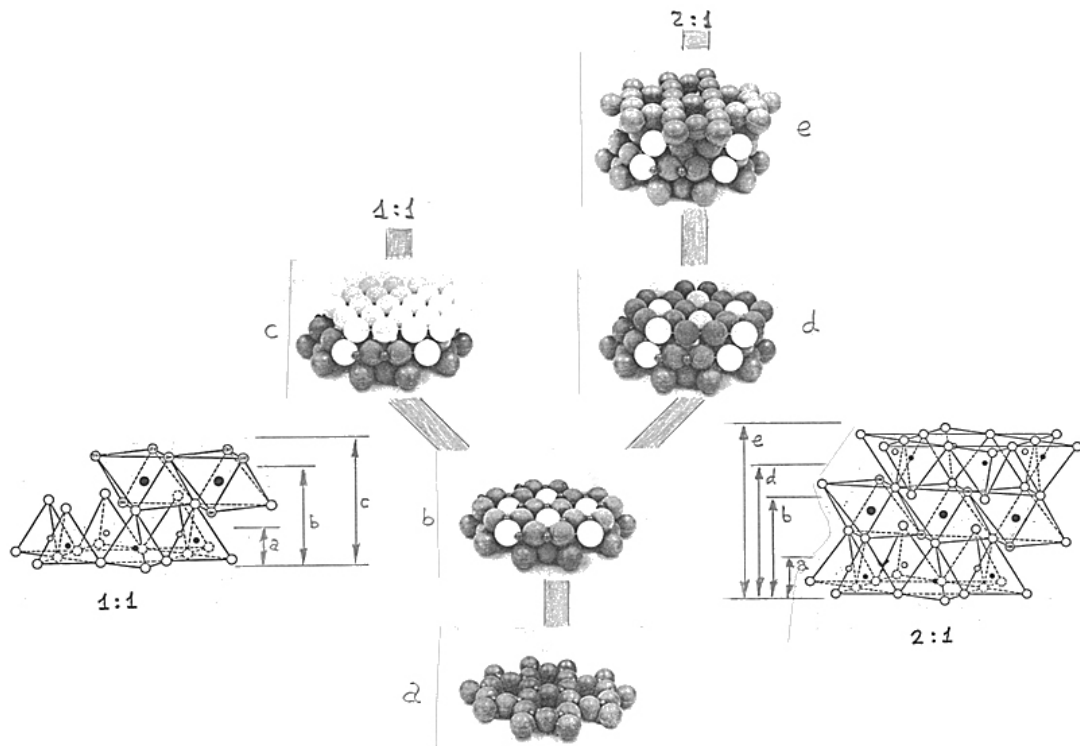


Figura 17. Arreglos estructurales (Grim, 1968)

➤ **Estructuras 1:1 y 2:1.** Estas estructuras corresponden a un arreglo  $x:y$  donde  $x$  representa el número de capas tetraédricas y  $y$  el número de

capas octaédricas. Si la estructura termina en el plano 5, todos los vértices están ocupados por OH y se trataría de una estructura de lámina 1:1 (formada por un tetraedro y un octaedro), pero si la estructura continúa, los iones de este plano son O y OH. En este caso este plano 5 sería igual al plano 3 (representado en el dibujo como 3b). Luego vendrán los planos 2b y 1b. Es como si el plano 4 fuese un plano de simetría que refleja a los planos 1, 2 y 3 a cada lado. Se forma la lámina 2:1 (dos capas de tetraedros que encierran a una de octaedros). La lámina 1:1 tiene un espesor de 7 amstrong mientras que para la 2:1 el espesor es de 9 (ver figuras 17 y 18).

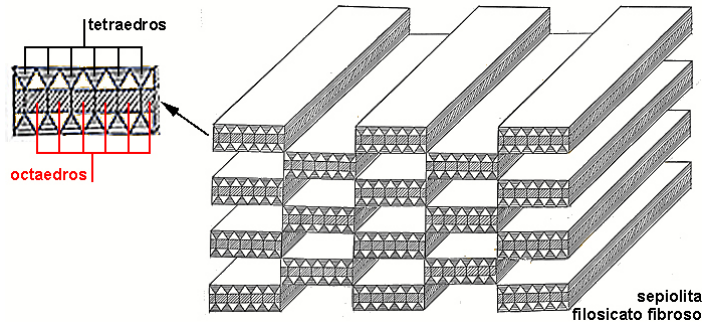


**Figura 18. Proceso de formación de las estructuras** ([www.edafologia.com](http://www.edafologia.com))

Los minerales del grupo de los filosilicatos se originan por simple apilamiento de láminas 1:1 ó 2:1. Como la capa octaédrica puede ser de Mg o de Al, básicamente se dan sólo cuatro combinaciones:

- 1:1 triocta → Serpentina
- 1:1 diocta → Caolinita
- 2:1 triocta → Talco
- 2:1 diocta → Pirofilita

Una variante aparece cuando los tetraedros, cada cierto número, se invierten. Los planos se interrumpen en esta zonas de tetraedros y octaedros girados 180°, apareciendo una estructura en listones, por lo que a estos filosilicatos se le llama fibrosos, en vez de laminares como corresponde al resto de las otras estructuras. Si el giro es cada 4 tetraedros el mineral es paligorskita (también llamado atapulgita) y si es cada 6 se trata de sepiolita (Figura 19).



**Figura 19. Estructura de la sepiolita** ([www.edafologia.com](http://www.edafologia.com))

Pero en la naturaleza se presentan un número muy numeroso de minerales dentro del grupo de los filosilicatos. Esto es debido a las sustituciones isomórficas entre los cationes octaédricos y tetraédricos. Además estas sustituciones suelen ser entre cationes de distinta valencia lo que origina

desequilibrios eléctricos en la red y para compensarse entran otros iones, que al no tener sitio en los nudos de la red, se sitúan entre las láminas 1:1 y mucho más frecuentemente entre las 2:1. Estos iones ínter laminares pueden entrar hidratados en diverso grado, separando las capas, con lo que el espesor del paquete es variable, normalmente oscila entre 10 y 18 amstrong.

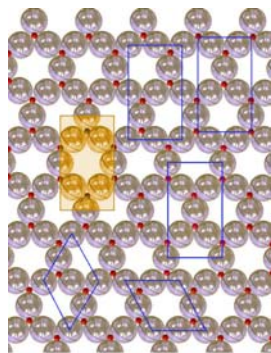
La sustitución normal en la capa tetraédrica es la del Si por el Al (el Al es un catión de coordinación octaédrica, pero, por su tamaño, frecuentemente se introduce en las capas tetraédricas produciendo una pequeña deformación en los tetraedros; esto no ocurre nunca con el Mg, de mayor tamaño). La sustitución de cada Si<sup>++++</sup> por un Al<sup>+++</sup> necesita de la incorporación de un catión ínter laminar monovalente, o si es un divalente lo hace por cada dos sustituciones Si por Al; este es el caso de las micas, en las que entra el K<sup>+</sup> como catión ínter laminar (espesor de 10 amstrong, fijo).

En las capas octaédricas es frecuente la sustitución entre el Al y el Mg; éste es el caso de la serie de las esmectitas, cuyo mineral más representativo es la montmorillonita (espesor de 14 amstrong, variable).

Existe la posibilidad de que los cationes interláminares que entren a compensar los déficit de carga sean a su vez cationes de coordinación octaédrica; se origina así una nueva capa de octaedros en el espacio ínter laminar y se le llama estructura de tipo 2:1+1 (el 2 representa a las dos capas de tetraedros y el 1+1 indica que las dos capas de octaedros no son iguales, ya que la capa octaédrica de la estructura 2:1 tiene la mayoría de los vértices compartidos con las capas de tetraedros vecinos, mientras que los octaedros del espacio ínter laminar no comparten ningún vértice con los tetraedros. El mineral típico es la clorita.

**1.2.2.6 Celda Unidad y Fórmula Estructural 1:1.**<sup>15</sup> Para estudiar una estructura cristalina, que se puede considerar como una determinada repetición de una inmensa cantidad de átomos, iones o moléculas, es muy útil reducir la red a su mínima expresión. Es decir la mínima cantidad de materia que por repetición origina toda la estructura cristalina (Figuras 20, 21 y 22).

La disposición es siempre según planos, por lo que es cómodo estudiar el ordenamiento en una serie de planos paralelos y por superposición de estos planos se obtiene todo el modelo tridimensional (Figura 23). El plano queda definido por el paralelogramo unidad y la estructura tridimensional por un paralelepípedo llamado *celda unitaria*, que queda definido por la dimensión de sus tres lados y los tres ángulos que estos forman (Figura 24).

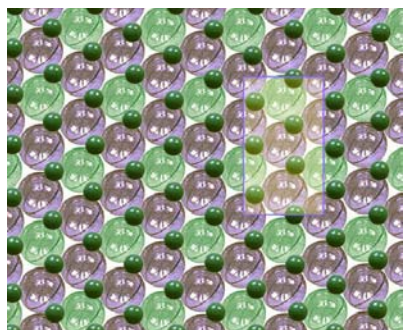


Esta malla de iones, como cualquier otra, se puede representar por muchos paralelogramos unidad. El **paralelogramo unidad** representa la mínima cantidad de materia que puede originar toda la malla, al desplazarla en la dirección de sus lados y con una periodicidad correspondiente a la longitud de ellos. Por superposición de los paralelogramos unidad correspondientes a los diferentes planos de la estructura de un mineral se origina **la celda unitaria**.

Para unificar criterios se tiende a elegir al paralelogramo unidad como aquél, de entre todos los posibles, que tenga sus lados lo más cortos posibles y con sus ángulos lo más próximos a 90°.

En esta malla podría ser cualquiera de los rombos, pero estos no son adecuados para representar al plano dioctaédrico que se coloca encima, por lo que se ha de elegir cualquiera de los rectángulos, por ejemplo una buena elección sería el seleccionado en color naranja.

**Figura 20. Paralelogramo unidad de los planos 1 y 2** (www.edafologia.com)

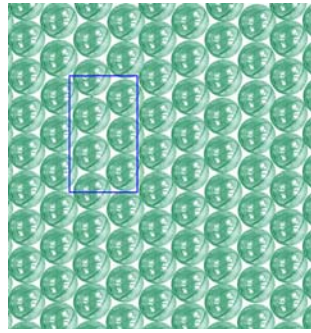


**Esferas grises:** O compartidos por los tetraedros y octaedros.

**Esferas verdes:** OH exclusivos de los octaedros. Estas esferas transparentes forman el plano común (plano 3) a los tetraedros (por debajo) y a los octaedros (por encima).

**Puntos verdes opacos:** Se encuentran en un plano superior y representan a los Mg del centro de los octaedros, al ocuparse todas las posibles posiciones octaédricas se trata de una capa trioctaédrica (plano 4).

**Figura 21. Paralelogramo unidad de los planos 3 y 4** (www.edafologia.com)



**Plano 5:** Vista desde arriba del plano superior de los octaedros, que en una estructura 1:1 está formado por un empaquetamiento hexagonal con todos los nudos de la red ocupados por OH.  
 Si la estructura fuese de tipo 2:1, los OH alternarían con O, al continuar la estructura, hacia arriba, con una nueva capa de tetraedros Si-O (como la de los planos 1 y 2, pero puesta ahora boca abajo).

Figura 22. Paralelogramo unidad del plano 5 (www.edafologia.com)

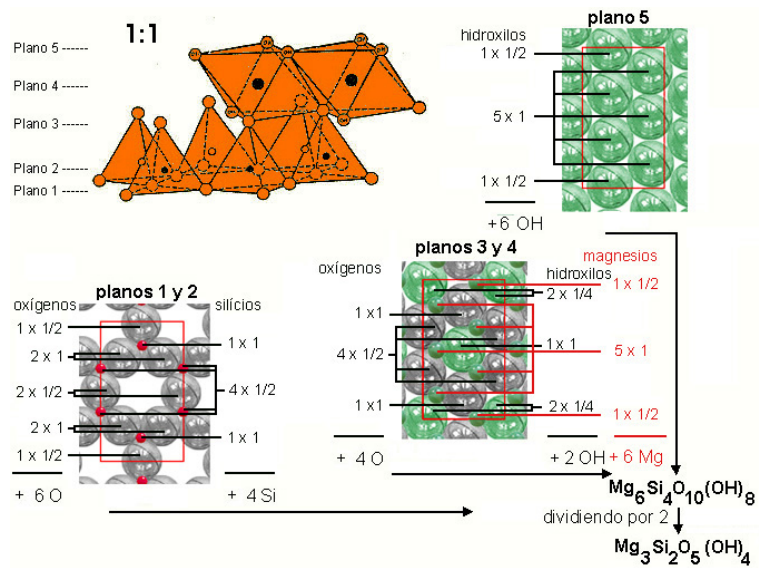


Figura 23. Paralelogramos unidad (www.edafologia.com)

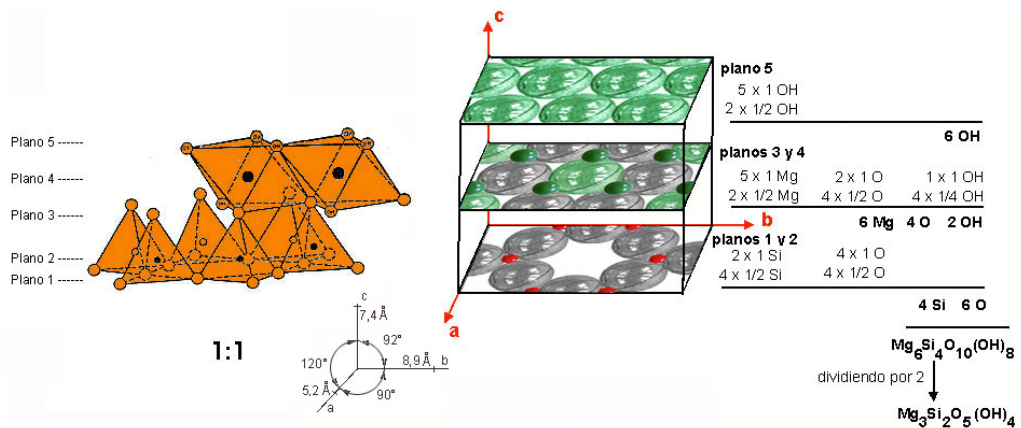
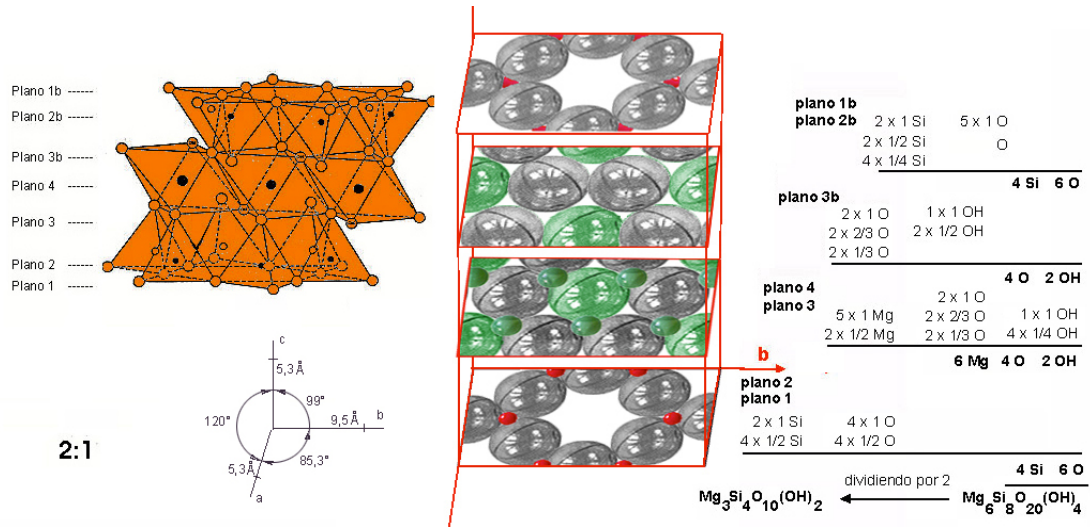


Figura 24. Celda unitaria y fórmula estructural 1:1 (www.edafologia.com)

**1.2.2.7 Celda Unidad y Fórmula Estructural 2:1.**<sup>15</sup> Para estudiar esta estructura tridimensional, se la puede considerar de manera similar al arreglo 1:1, obteniéndose una celda unitaria como se muestra en la Figura 25.



**Figura 25. Celda unitaria y fórmula estructural 2:1** (www.edafologia.com)

El ensamblaje total de una lámina más el material inter laminar es también referido como una *unidad estructural* (Ver Tabla 5), esta estructura mencionada es usualmente referida como la estructura Hofmann<sup>44</sup>, donde la distancia entre un cierto plano en la lámina y el correspondiente plano en la lámina siguiente es llamado *espaciamiento c*, el cual permite distinguir entre arcillas de arreglo de capa 1:1 con un espaciamiento *c* de alrededor de 7,1-7,2 Å y arcillas de arreglo de capa 2:1 con un espaciamiento *c* de por lo menos 9,2 Å.

Una clasificación esquemática de los filosilicatos según su tipo de arreglo y fórmula estructural es presentada en el Anexo A.

Los minerales de *pirofilita* y *talco* consisten de pilas de las láminas anteriormente descritas. La fuerza cohesiva entre las láminas es principalmente electrostática, aumentada por la atracción de van der Waals. Sin embargo, dividir paralelamente a las láminas es relativamente fácil, y este hecho explica por que estos minerales existen en forma de hojuelas. Dado que estas hojuelas son más bien gruesas y grandes, ellas ofrecen aparentemente una resistencia mecánica razonable contra las fuerzas a las cuales están sometidos en la naturaleza. Ellas no se desintegran a un tamaño el cual es típico para los minerales arcillosos. Por eso, ellas no están clasificados como minerales arcillosos, pero si como minerales *tipo mica*.

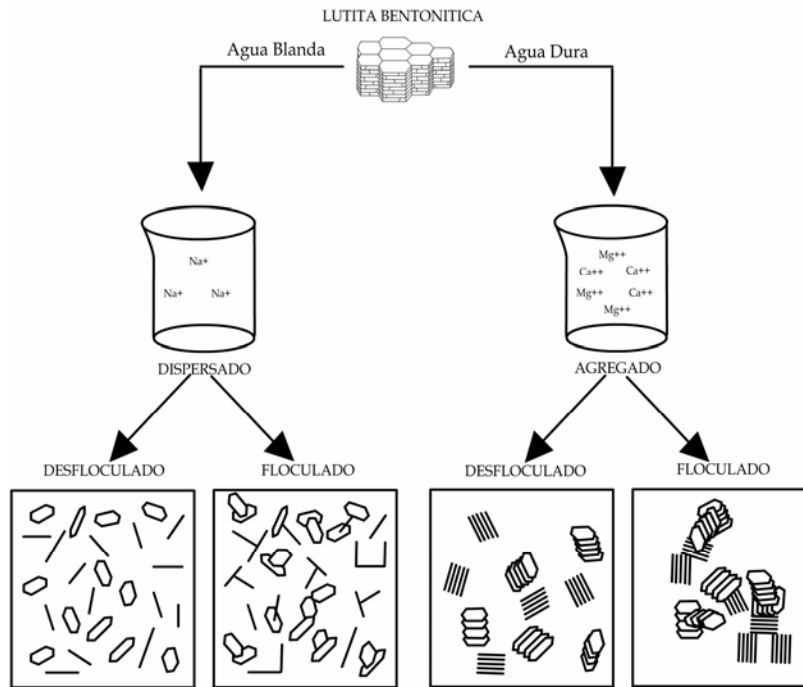
### **1.2.3 Clasificación de las Arcillas.**

**1.2.3.1 Arcillas Expandibles en Agua.**<sup>29</sup> Mientras los ripios de lutita están siendo bombeados hacia arriba por el anular después de que son liberados desde su matriz por la broca, el grado en el cual estos ripios llegaran a ser un contaminante para los fluidos de perforación base agua dependen principalmente de:

- El tipo y cantidad de arcilla presente en los ripios.
- Las características de la fase continua del lodo (filtrado).

El asunto es ilustrado en la Figura 26 donde el comportamiento de la bentonita (esmeclita) en agua y en solución electrolítica. Dispersión, agregación, floculación y defloculación son términos básicos en el vocabulario de la tecnología de fluidos de perforación. Como es sugerido en la Figura 26, la dispersión significa disminución de la asociación cara a cara, y agregación significa aumento de la asociación cara a cara. La floculación es

aumento de la asociación borde - cara, y desfloculación es una disminución en la asociación borde - cara.



**Figura 26. Bentonita de sodio y calcio en agua (NL Baroid, 1979)**

Cuando la lámina de arcilla entra al lodo con filtrado de agua dulce, los iones cargados positivamente (cationes) se separan de la superficie de la arcilla, la cual tiene predominantemente una carga negativa. Dado que las moléculas de agua son polares, tanto cationes como superficie de la arcilla atraen las moléculas de agua. El polo negativo de la molécula de agua es orientada hacia el catión, y el polo positivo de la molécula de agua es orientado hacia la cara de la arcilla.

Los cationes hidratados son aun atraídos a la cara de la arcilla debido a la diferencia en las cargas. Hay entonces una capa de agua inmediatamente adyacente a la cara de la arcilla, y una segunda capa mantenida por los

cationes a una corta distancia fuera de la cara de la arcilla. Esta combinación de dos capas de agua cerca de las partículas de arcilla es llamada la *doble capa difusa*. En aguas de mediana salinidad, la doble capa difusa es comprimida, y la partícula ocupa menos volumen que el que ocupa en agua fresca.

En aguas de alta salinidad la doble capa es comprimida aun más, ya alguna agregación (asociación cara a cara) ocurre. Como consecuencia, el tamaño de la partícula es reducido aun más, y el número total de partículas por unidad de volumen es reducido también. La relación entre el tipo y la concentración de sal en el agua a la cual la agregación ocurre es indicada por lo siguiente:

Cloruro de Sodio: 400 meq/l (8,20 lb/bbl NaCl),

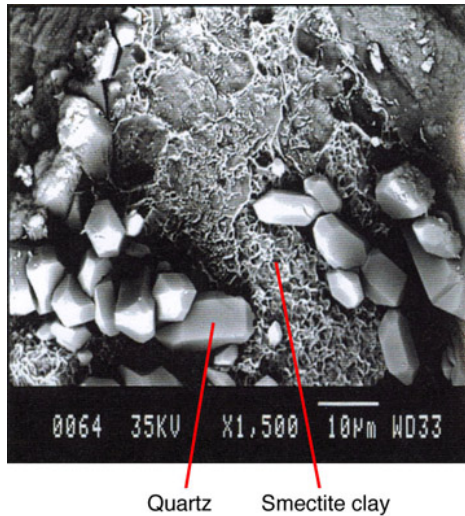
Cloruro de Calcio: 20 meq/l (0,389 lb/bbl CaCl<sub>2</sub>),

Cloruro de Aluminio: 10 meq/l (0,156 lb/bbl AlCl<sub>3</sub>).

Se puede inferir de los datos que a más alta valencia de los cationes de las sales en el filtrado la hidratación de la arcilla será menor y mayor será la tendencia de las arcillas dispersas a agregarse. Como un corolario, si las arcillas en un ripio de lutita dado están agregadas cuando la lutita es perforada, entonces la tendencia de los ripios a dispersarse cuando entran en contacto con el lodo variará inversamente con la valencia de los cationes de sales en el filtrado.

**a. Montmorillonita.** (Arreglo Estructural 2:1).<sup>20,44</sup> La estructura de los minerales de este grupo (también llamado esmectita, ver Figura 27) se deriva de los prototipos pirofilita y talco mediante la sustitución de átomos. De acuerdo a estos conceptos la montmorillonita esta compuesta de unidades constituidas de dos capas tetraedrales de sílice con una capa octaedral de

aluminio en el centro. Los átomos comunes tanto a la capa octaedral y tetraedral se convierten en oxígeno en lugar de hidroxilos.

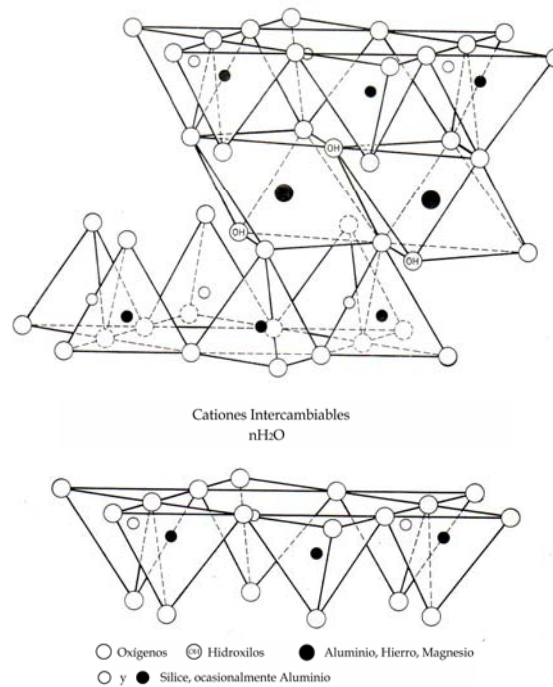


**Figura 27. SEM de una esmectita (www.slb.com)**

En la capa tetraedral, el Si tetravalente es algunas veces en parte reemplazado por Al trivalente. En la capa octaedral, puede haber reemplazo de Al trivalente por Mg divalente sin llenado completo de la tercera posición vacante. Los átomos de Al también pueden ser reemplazados por Fe, Cr, Zn, Li y otros átomos. Estos reemplazamientos resultan en un exceso de carga negativa la cual es compensada por la adsorción de cationes en la superficie de la lámina debido a que son demasiado grandes para ser acomodados en el interior de cristal.

En el apilamiento de las unidades de Si-Al-Si, las capas de oxígeno de cada unidad están adyacentes a los oxígenos de las unidades vecinas dando origen a enlaces muy débiles y una división entre ellas. La característica sobresaliente de la estructura de la montmorillonita es que el agua y otras moléculas polares, tales como ciertas moléculas orgánicas, pueden entrar

entre las láminas de la unidad causando que el mineral se expanda en la dirección  $c$  (ver Figura 24). La dimensión del eje  $c$  de la montmorillonita no es fija pero varía de  $9,6 \text{ \AA}$ , cuando moléculas no polares están entre las láminas de la unidad (para las arcillas secas), pasando por un rango de hinchamiento que va desde  $12,5$  a  $20 \text{ \AA}$ , hasta separación completa en algunos casos. La cantidad de agua que puede adsorber la unidad, esta controlada por su estructura y por la naturaleza del catión intercambiable. La Figura 28 es un diagrama esquemático de esta estructura de la montmorillonita.



**Figura 28. Estructura de la montmorillonita (Grim, 1962)**

Las arcillas bentonita, las cuales están compuestas principalmente de montmorillonita, son altamente dispersables en agua. Particularmente cuando el catión intercambiable es el Na, las partículas pueden separarse en unidades de alrededor del espesor de una celda unitaria.

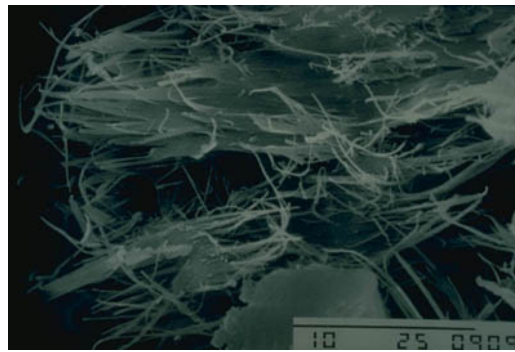
Otros minerales de este grupo son la saponita, nontronita, hectorita, entre otros, los cuales se originan debido a la sustitución parcial o total de los átomos de la unidad estructural.

**1.2.3.2 Arcillas No Expandibles en Agua.**<sup>29</sup> Cuando las arcillas en un ripio de lutita dado son illita, clorita y caolinita, entonces el ripio se comportara esencialmente como sigue después de entrar en el lodo:

- La partícula de lutita se hidratará muy poco sin tener en cuenta el tamaño.
- Las sales en la fase acuosa del lodo serán usualmente efectivas para la supresión de la dispersión, como con las lutitas que contienen arcillas expandibles.
- La tendencia de los ripios a romperse durante el viaje hacia arriba por el anular dependerá del contenido de agua de los ripios y de la disponibilidad de fracturas en los ripios. Tanto un alto contenido de agua como la presencia de fracturas naturales en la partícula de lutita volverán al ripio susceptible a la desintegración. De otra forma el ripio tendera a permanecer intacto.

**a. Illita.** (Arreglo Estructural 2:1).<sup>20,44</sup> Los minerales de illita son similares en sus características estructurales a las micas, especialmente a la moscovita y a la flogopita, consideradas como los minerales prototipo para las illitas (Figura 29). La unidad estructural básica esta compuesta de dos capas tetraedrales de sílice con una capa octaedral central de aluminio. Ellas son distinguidas de la montmorillonita principalmente por la ausencia de hinchamiento entre las capas.

En estos minerales (micas), uno de los cuatro átomos de sílice en la capa tetraedral es substituida por un átomo de aluminio, y el defecto de una carga positiva es compensado por un ión potasio el cual esta localizado sobre la superficie de la capa. Dado que las láminas no se separan con la adición de agua, los iones potasio entre las láminas no están disponibles para intercambio, solamente estos iones potasio sobre las superficies externas pueden ser intercambiados por otros cationes. No hay sustitución en la capa octaedral en estos minerales. La Figura 30 es un diagrama esquemático de esta estructura de la illita.

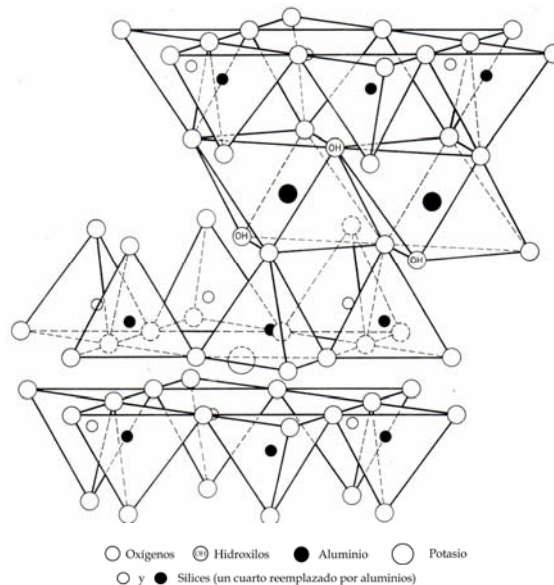


**Figura 29. SEM de una illita** (www.slb.com)

El espaciamiento basal de estos minerales es de cerca de  $10 \text{ \AA}$ , el cual es el mismo que el de la montmorillonita con iones de potasio como iones de intercambio en el estado seco.

El carácter no hinchable de las arcillas de illita es atribuido al efecto específico de unión electrostático mediante los iones potasio. Estas uniones son más fuertes que en las montmorillonitas donde la carga negativa se concentra más en la capa octaedral y de aquí que haya una distancia más grande de los iones potasio que en las illitas, la cual tiene una sustitución predominantemente tetraedral (carga concentrada en la superficie).

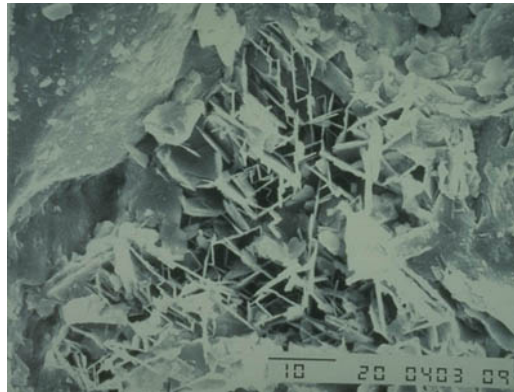
Dado que solamente los cationes externos de la illita son intercambiables, su CEC es más pequeño que el de las montmorillonitas.



**Figura 30. Estructura de la illita (Grim, 1962)**

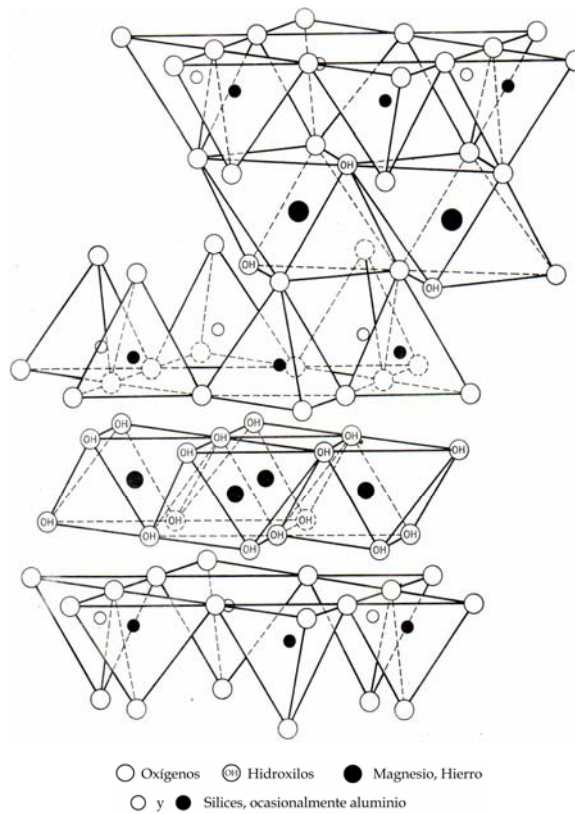
Los iones potasio pueden ser desplazados bajo la acción de un medio ácido, para formar especies minerales llamadas illitas degradadas, permitiendo que mayor cantidad de agua penetre entre las capas y produzca expansión.

**b. Clorita.** (Arreglo Estructural 2:1+1).<sup>20,44</sup> Son arcillas minerales las cuales están estructuralmente relacionadas a las arcillas de lámina 2:1. En estos minerales, los cationes compensantes de carga entre las capas de tipo montmorillonita son reemplazadas por un lámina octaedral de hidróxido de magnesio antiguamente llamada brucita. La lámina de estructura 2:1 esta desbalanceada debido a la sustitución de sílice por aluminio, y este exceso de carga negativa es balanceado por un exceso de carga positiva en la lámina de brucita como una consecuencia de las sustituciones del magnesio por aluminio. El espaciamiento basal característico de cloritas es de 14,2 Å.



**Figura 31. SEM de una clorita (www.slb.com)**

La Figura 32 es un diagrama esquemático de esta estructura de la clorita.

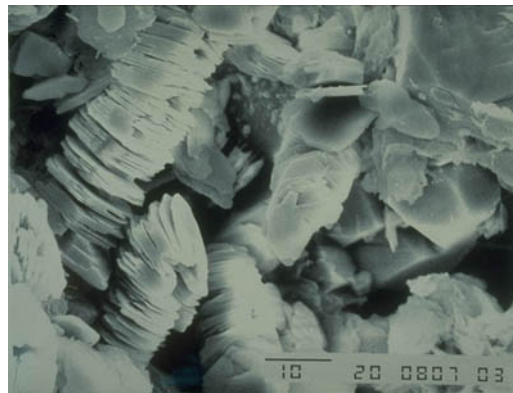


**Figura 32. Estructura de la clorita (Grim, 1962)**

Dado que estos minerales parecen existir siempre en mezclas con otros

minerales arcillosos, los cuales han impedido el estudio de los atributos del mineral, poco es conocido referente a su dispersabilidad. Parece probable, sin embargo, que lo establecido referente a la dispersabilidad y al tamaño de las partículas de illita aplicaría a los minerales de clorita.

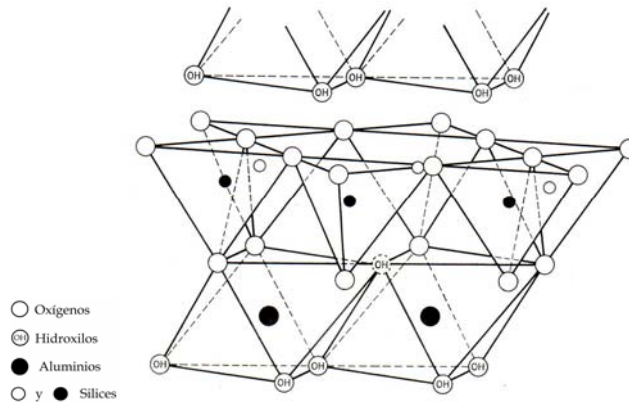
**c. Caolinita.** (Arreglo Estructural 1:1).<sup>20,44</sup> La unidad estructural de la caolinita esta compuesta de una capa tetraédrica de sílice y una capa octaédrica de aluminio. Debido a la superposición de los planos de hidroxilo y oxígeno en unidades adyacentes, las unidades se mantienen juntas por enlaces de hidrogeno entre las capas. Este efecto enlazante del hidrogeno hace que el mineral no sea fácilmente dispersable en agua. El espesor de estas unidades es de cerca de 7 Å. La Figura 34 es un diagrama esquemático de esta estructura de la caolinita.



**Figura 33. SEM de una caolinita** (www.slb.com)

Los minerales del grupo de la caolinita (dicrita, nacrita, halloysita, etc.) no son expandibles en agua, pero ciertos compuestos son capaces de expandir sus cristales como lo son las sales de acetato de potasio y compuestos con fuertes enlaces de hidrógeno tales como urea e hidracina.

Dado que el espaciamiento basal de la caolinita no aloja los cationes intercapa, todos los cationes que compensan la carga pueden ser adsorbidos sobre las superficies exteriores de la pila de capas que representan una partícula, como ocurre en las montmorillonitas y en las illitas.



**Figura 34. Estructura de la caolinita (Grim, 1962)**

### 1.2.3.3 Otras Arcillas.

**a. Ínter estratificada.**<sup>20,44</sup> Las arcillas naturales algunas veces consisten de partículas en las cuales láminas de diferentes tipos de minerales arcillosos están apiladas (inter estratificación). Estas arcillas son también llamadas *de lámina mezclada*. Es posible estimar el porcentaje de láminas que pertenecientes a un cierto grupo de arcilla mediante análisis de difracción de rayos X.

La estructura ínter estratificada puede ser de dos tipos diferentes. Una puede ser una repetición regular de diferentes láminas como sucede en la clorita y la es una estratificación de láminas de repetición no uniforme.

Las láminas mezcladas de illita - montmorillonita, y de clorita - vermiculita son particularmente comunes. En general, la dispersabilidad de estos materiales es relativamente más alta debido a la reducción en la resistencia de los enlaces. Este sería el caso, cuando uno de los componentes es un mineral expansible y el otro un mineral no expansible.

**b. Vermiculita.**<sup>20</sup> Análisis han mostrado la presencia frecuente en materiales arcillosos de minerales con una dimensión del eje c de 14 Å la cual no se expande cuando entra en contacto con moléculas polares pero colapsa alrededor de los 10 Å al deshidratarla con calor. La partícula, por eso, tiene algunas de las características estructurales de la clorita y algunas de la montmorillonita.

El mineral está compuesto de unidades de silicato del tipo encontrado en las micas y que tiene una deficiencia de carga neta similar a aquella encontrada en la clorita mineral. La deficiencia de carga es balanceada por los iones de magnesio hidratados que existen entre las láminas de silicato. La estructura es, por lo tanto, como la de la clorita excepto que existen iones de magnesio hidratados en lugar de la capa de brucita. La organización del agua alrededor de los iones de magnesio y su carga relativamente grande previene la expansión del mineral cuando se trata con moléculas polares.

En los materiales arcillosos la vermiculita existe generalmente en ensamblaje interestratificado, por lo que sus propiedades al igual que la clorita no son totalmente comprendidas.

**c. Hornita.**<sup>44</sup> Como se expuso anteriormente, un principio diferente de elementos tetraedrales y octaedrales de la celda unidad es encontrada en la

hormita. La celda unidad tiene canales muy estrechos en los cuales las moléculas de agua y los cationes intercambiables están localizados.

La hormita se cristaliza en forma de largas agujas. Entre los minerales de este grupo se encuentra la paligorskita (también llamada atapulgita), sepiolita y xilotila, los cuales difieren esencialmente en la dimensión de las piezas y en los reemplazos dentro de la estructura. Las atapulgitas son bien conocidas en lodos<sup>22</sup> de perforación porque su estructura de bastoncillos al someterse a esfuerzos de corte se parte longitudinalmente y se agrupan como espigas en un pajar lo que le permite viscosificar salmueras.

**d. Minerales alófanos.**<sup>20</sup> Son aquellos constituyentes de los materiales arcillosos los cuales son amorfos a la difracción de rayos X. Esto no quiere decir que tales materiales tengan una ausencia completa de cualquier organización estructural. Más bien, significa que el ordenamiento de las unidades octaédricas y tetraédricas con respecto al otro no es lo suficientemente regular para permitir difracción o son demasiado pequeñas en tamaño para producir efectos de difracción.

Los componentes alófanos no tienen forma ni composición química definida. La organización parece aproximarse a la halloysita en sus atributos generales, mientras en otros casos parece asemejarse a la montmorillonita. En general, las propiedades de los alófanos varían tremendamente. Por eso, el material puede ser dispersable en partículas extremadamente pequeñas o pueden ser esencialmente no dispersable en agua.

## 1.2.4 Reacción Química de las Arcillas.

**1.2.4.1 Intercambio Iónico.**<sup>20</sup> Los minerales arcillosos tienen la propiedad de adsorber ciertos aniones y cationes y mantenerlos en estado intercambiable; es decir, ellos son intercambiables por otros aniones o cationes mediante tratamiento con tales iones ya sea en una solución acuosa o no acuosa. La reacción de intercambio es estequiométrica. Los iones intercambiables son mantenidos alrededor de las unidades estructurales Si-Al, y la reacción de intercambio generalmente no afecta esta estructura.

La propiedad de capacidad de intercambio es medida en términos de miliequivalentes (meq) por gramo o más frecuentemente por cada 100 gramos de arcilla. Las capacidades de intercambios son determinadas a un pH neutro.

Con respecto al intercambio iónico, un mayor conocimiento se tiene del intercambio catiónico que del intercambio aniónico. En los materiales arcillosos los cationes intercambiables más comunes son Ca, Mg, H, K, NH<sub>4</sub> y Na. Los aniones más comunes en los materiales arcillosos son el sulfato, cloro, fosfato y nitrato.

La propiedad de intercambio iónico es fundamental y de gran importancia práctica en la investigación de los materiales arcillosos porque la naturaleza de los iones intercambiables puede influir substancialmente en las propiedades físicas del material.

**a. Intercambio Catiónico.**<sup>20</sup> La capacidad de intercambio catiónico, se define como la habilidad de una arcilla para adsorber cationes en su superficie o en

sus bordes. Esta capacidad puede ser medida mediante captación del azul de metileno. La prueba es aplicable a lodos de perforación, y también puede ser utilizado para evaluar arcillas y lutitas secas. La prueba de azul de metileno (MBT) mide la capacidad de intercambio catiónico total del sistema de arcilla, y depende del tipo y cantidad de arcilla presente. La importancia del MBT en la tecnología de lodos es que es una medida de la cantidad de arcilla en el lodo. La cantidad total de sólidos es medida por la retorta; el MBT es un indicador de la actividad de los sólidos.<sup>29</sup>

El rango de la capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos esta dado en la Tabla 6.

**Tabla 6**  
**Capacidad de Intercambio Catiónico de Minerales Arcillosos**

MINERAL ARCILLOSO	CEC (meq/100 g)
Caolinita	3 - 15
Halloysita 2H <sub>2</sub> O	5 - 10
Halloysita 4H <sub>2</sub> O	10 - 40
Montmorillonita	80 - 150
Illita	10 - 40
Vermiculita	100 - 150
Clorita	10 - 40
Hormita	20 - 30

**Fuente:** Grim, R.: Applied Clay Mineralogy. 1962.

Hay tres causas de la capacidad de intercambio catiónico:

- Enlaces rotos alrededor de los bordes de las unidades Si-Al llevarían a cargas insatisfechas las cuales serian balanceadas por cationes adsorbidos que son mantenidos alrededor de los bordes de las piezas y unidades alargadas. El número de enlaces rotos y por lo tanto la

capacidad de intercambio, aumenta a medida que el tamaño de la partícula disminuye. En los minerales de caolinita y halloysita los enlaces rotos son la causa principal de la capacidad de intercambio. En los minerales de illita, clorita y hormita los enlaces rotos son una causa importante de la capacidad de intercambio. En la montmorillonita y vermiculita los enlaces rotos son responsables por una porción relativamente pequeña de la capacidad de intercambio (20%).

- Las sustituciones dentro de la estructura cristalina, de silicio cuadrivalente por aluminio trivalente en la capa tetraedral y de aluminio trivalente por iones de valencia más baja (particularmente magnesio) en la capa octaedral, resulta en cargas desbalanceadas en las unidades estructurales que se concentran en la superficie de la lámina de algunos minerales arcillosos. En la montmorillonita y la vermiculita las sustituciones dentro de la estructura red causan cerca del 80% de la capacidad de intercambio catiónico. En los minerales de illita, clorita y hormita una pequeña cantidad de la capacidad de intercambio catiónico resulta de las sustituciones dentro de la estructura.
- El posible, aunque improbable, reemplazamiento del hidrógeno de los hidroxilos expuestos alrededor de los bordes rotos de los minerales de arcilla.

La tasa de reacción de intercambio catiónico varía con el mineral arcilloso, la concentración de cationes, y con la naturaleza y concentración de los aniones. En general, la reacción para la caolinita es más rápida, siendo casi instantánea. Es un poco más lento para la montmorillonita y la atapulgita y requiere incluso de mayor tiempo, tal vez horas, para la illita y clorita.

Los primeros estudios del intercambio catiónico concluyeron que la capacidad de reemplazamiento de los iones incrementa en el siguiente orden:



Esto significa por ejemplo que en general el calcio reemplazará más fácilmente al sodio, que este al calcio. En general, el orden de reemplazamiento de cationes para la mayoría de las arcillas es una función de la valencia, es decir, los cationes trivalentes son los más difíciles de reemplazar mientras que los monovalentes son fácilmente reemplazados por estos. El hidrógeno es la única excepción a esta regla y es más difícil de reemplazar que los cationes trivalentes.<sup>35</sup> Se debe tener en cuenta que no hay una serie de reemplazabilidad universal puesto que esta depende de las condiciones de experimentación, del anión involucrado y del tipo de arcilla.

La naturaleza del catión intercambiable en el material arcilloso es indicada frecuentemente por una determinación del pH. Por eso un valor de pH alrededor de 9 sugiere sodio; de 7,5 sugiere calcio; de menos de 7 sugiere hidrógeno. Debe notarse que todas las arcillas ácidas probablemente también llevan hierro y/o aluminio en posiciones intercambiables.

**b. Intercambio Aniónico.**<sup>20</sup> La investigación del intercambio aniónico es muy difícil, principalmente debido a la posibilidad de que los minerales arcillosos se descompongan en el proceso de la reacción. Por eso, en estudios de la adsorción del fosfato por la caolinita ha habido argumentos considerables acerca de si muchos resultados observados son debidos a la adsorción, al reemplazamiento de iones hidroxilos en la caolinita por iones fosfato, o la

reacción entre el fosfato y el aluminio producido por alguna destrucción de la lámina de caolinita que tiene lugar durante la reacción.

Al parecer hay algunas posibles explicaciones para las reacciones de intercambio aniónico en los minerales de arcilla:

- La reacción puede ser debida a la presencia de enlaces rotos alrededor de los bordes de las partículas de los minerales arcillosos. Se esperaría que los enlaces rotos provean muchas posiciones tanto positivas como negativas alrededor de los bordes de las partículas del mineral de arcilla de tal manera que la capacidad de intercambio aniónico debida a esta causa igualaría la capacidad de intercambio catiónico.
- Los hidroxilos sobre la superficie de las partículas del mineral de arcilla aparentemente pueden entrar en las reacciones de intercambio.
- Se ha mostrado que otro factor en el intercambio aniónico es la geometría del anión en relación a la geometría de las unidades estructurales de los minerales arcillosos. Los aniones tales como el fosfato, arseniato y borato, los cuales tienen cerca del mismo tamaño y geometría del tetraedro de sílice, puede ser adsorbido mediante fijación al borde de la lámina tetraedral de sílice y crecer como extensión de estas láminas.

La Tabla 7 muestra las capacidades de intercambio aniónico para algunos de los minerales arcillosos.

**Tabla 7**

**Capacidad de Intercambio Aniónico de Minerales Arcillosos**

<b>MINERAL ARCILLOSO</b>	<b>AEC (meq/100 g)</b>
Montmorillonita, Wyoming	23
Montmorillonita, Geisenheim	31
Beidelita, Unterrupsroth	21
Nontronita, Untergriesbach	20
Nontronita, Pfreimdtal	12
Saponita, Groschlattengrum	21
Vermiculita, South Africa	4
Caolinita (coloidal)	20,2
Caolinita, Melos	13,3
Caolinita, Schnaittenbach	6,6

**Fuente:** Grim, R.: Applied Clay Mineralogy. 1962.

Una relación promedio de la capacidad de intercambio catión a anión es cerca de 0,5 para la caolinita; 2,3 para la illita y 6,7 para la montmorillonita. La capacidad de intercambio aniónico relativamente más grande para la caolinita es atribuida a un mayor número de hidroxilos expuestos, y la capacidad de intercambio catiónico relativamente más grande para la illita y la montmorillonita es atribuida a la influencia de las sustituciones en la lámina.

### **1.3 PRINCIPIOS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS LUTITAS**

Para establecer que recursos pueden explotarse para lograr la estabilización de la lutita y mejorar el desempeño operacional de la perforación con lodos base agua, primero deben comprenderse los principios del problema de inestabilidad de la lutita.<sup>47</sup>

**1.3.1 Balance de Fuerzas.**<sup>47</sup> La Figura 35 da un modelo simple (lámina de arcilla conectadas a un poro) pero práctico para las fuerzas que actúan sobre

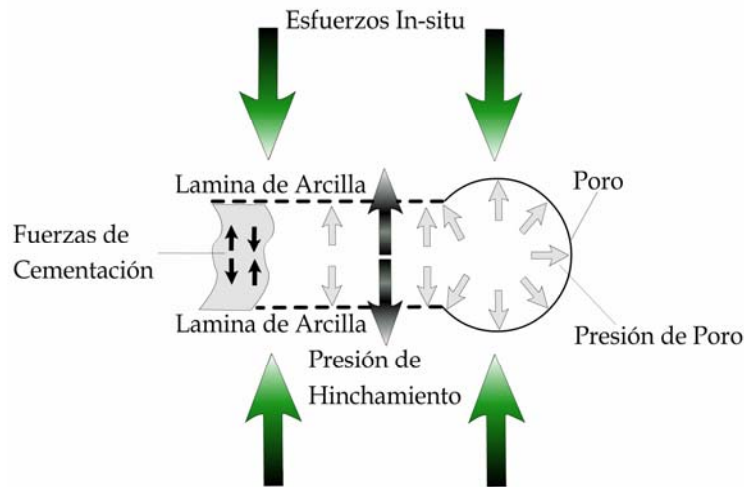
un sistema de lutita que contiene arcillas y otros minerales (principalmente cuarzo) de tamaño sedimentario. Ellas pueden subdividirse en fuerzas mecánicas, tales como:

- Los esfuerzos horizontales y verticales (de sobrecarga) in-situ.
- La presión de poro.
- La fuerza que actúa en los puntos de contacto inter granular, por ejemplo, en las uniones de la cementación. Estas fuerzas de tensión o compresión en la cementación se originan debido a cargas de compresión o de tensión sobre el material de la lutita, respectivamente.

Y en fuerzas físico-químicas, actuando principalmente en el género arcilloso, que incluyen:

- La atracción de van der Waals.
- La repulsión electrostática de Born.
- Fuerzas repulsivas y atractivas de corto alcance que se derivan de la hidratación ó solvatación de las superficies arcillosas y los iones que están presente en los espacios ínter laminares (adsorbidos o libres).

Estas últimas fuerzas normalmente se agrupan para formar la *fuerza ó presión de hinchamiento (hidratación)* que actúa entre las láminas, puesto que ellas son responsables por el comportamiento de hinchamiento característico de las arcillas y lutitas.



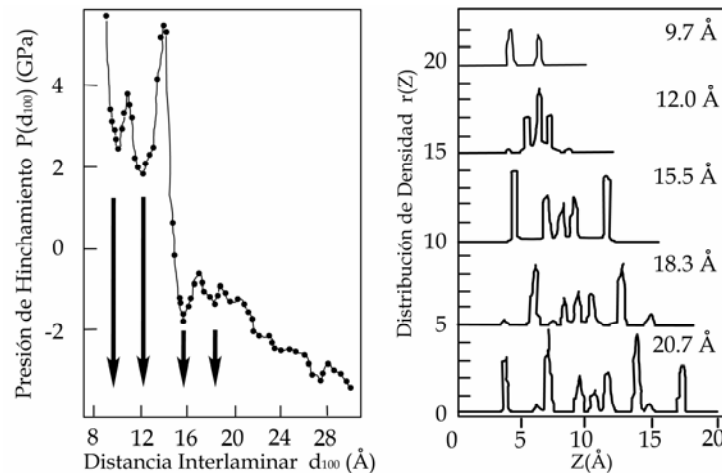
**Figura 35. Representación de esfuerzos de fondo** (van Oort, 2003)

**1.3.2 Presión de Hinchamiento.**<sup>47</sup> La atracción de van der Waals y la repulsión de Born se combinaron con éxito en la teoría de DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek)<sup>44</sup>, que aplica al comportamiento de las suspensiones coloidales de arcilla. Sin embargo, esta teoría no aplica a pequeñas distancias entre láminas de arcilla (es decir las distancias  $< 20 \text{ \AA}$ ) presente en la mayoría de lutitas bien consolidadas encontradas en campo. A tales distancias, las fuerzas repulsivas de corto alcance llegan ser predominantes.

La Figura 36 muestra los resultados del estudio de una dinámica molecular (MD) que simula la presión de hinchamiento en una montmorillonita sódica. El perfil de presión despliega oscilaciones que relacionan las capas de agua entre las láminas de arcilla, donde los estados estables son indicados por flechas. La distribución de densidad de átomos de oxígenos en agua como una función de la distancia  $Z$  desde la capa octaedra, muestra la montmorillonita-Na durante los saltos de hinchamiento desde dos capas de

agua a un espaciamento ínter laminar de 9,7 Å, a tres capas a 12,0 Å, a cinco capas a 15,5 Å, a siete capas a 18,3 Å, etc.

Para los estados de cuatro, seis y ocho capas de agua, se encontró que eran altamente repulsivos y por consiguiente inestables. Este ejemplo muestra la naturaleza complicada de la presión de hinchamiento y es diciente del por qué intentar explicar el hinchamiento arcilla-lutita en base a modelos simplistas (como el modelo osmótico de hinchamiento) se ha encontrado poco exitoso.



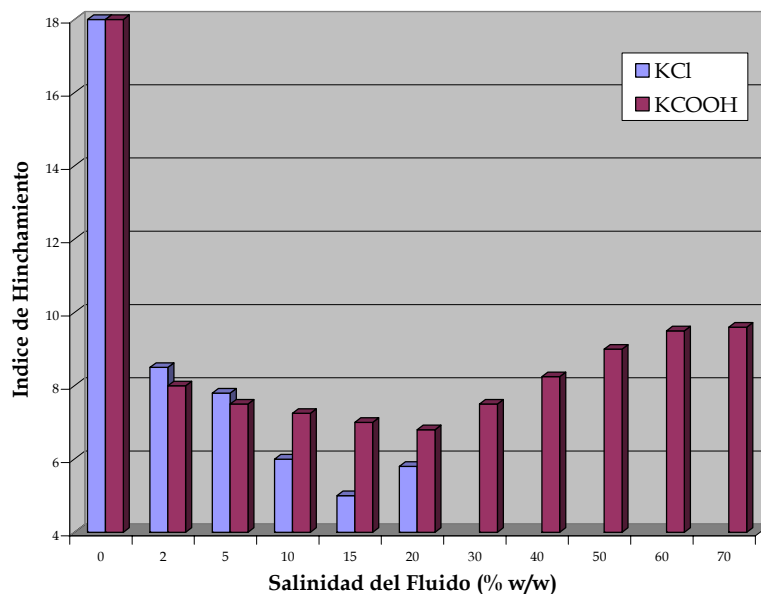
**Figura 36. Dinámica molecular de la montmorillonita-Na** (van Oort, 2003)

Durante décadas, la solución normal de campo a los problemas de arcilla-lutita ha sido la *inhibición*, un término que se derivó originalmente de la habilidad de ciertos aditivos, más notablemente las sales, para *inhibir* el rendimiento de la bentonita en el agua. El término se está confundiendo puesto que el comportamiento coloidal de las arcillas (dentro del lodo) y el hinchamiento en las lutitas bien consolidadas (en la formación) no están relacionados. Por ejemplo, la capacidad de floculación de la arcilla,

gobernada por las fuerzas DLVO, es mayor a medida que aumenta la valencia del ión (la bien conocida regla Schulze-Hardy<sup>44</sup>). En comparación, la presión de hinchamiento gobernada por fuerzas no-DLVO, como la hidratación del ión, sigue la tendencia inversa, por ejemplo, el  $K^+$  es mucho más efectivo que  $Ca^{+2}$  o  $Mg^{+2}$  reduciendo la presión de hinchamiento en la montmorillonita, porque el diámetro del ión hidratado de  $K^+$  es menor que el del  $Ca^{+2}$  o  $Mg^{+2}$ . Por tanto, los términos de campo *inhibición* e *inhibidor* aplicarán estrictamente a aditivos destinados a reducir la presión de hinchamiento. *Inhibición*, sin embargo, no es necesariamente un sinónimo para la *estabilización de la lutita*, como se verá en la siguiente sección.

La efectividad de los iones  $K^+$  reduciendo la presión de hinchamiento en la montmorillonita se cree que está relacionado con un pequeño grado de hidratación de estos iones en el agua, produciendo una baja repulsión del ión. Los efectos de hidratación del ión, sin embargo, no son fáciles de explicar.

La Figura 37 muestra los resultados de una prueba de odómetro, la cual mide el grado de hinchamiento de una muestra de lutita rica en montmorillonita que se sumergió en soluciones concentradas de KCl (Cloruro de Potasio) y KCOOH (Formiato de Potasio). El hinchamiento fue medido durante una secuencia de descarga y se cuantificó en términos de un índice de hinchamiento. A bajas concentraciones de sal, es decir < 20% w/w, una reducción en el hinchamiento (mostrado como una reducción en el índice de hinchamiento) se vio con un aumento en el contenido de  $K^+$ . A altos niveles de sal, sin embargo, el hinchamiento aumentó de nuevo.



**Figura 37. Prueba de odómetro** (van Oort, 2003)

Éstos resultados son explicados considerando el aumento en la repulsión del ión que deriva de la introducción de un exceso de iones hidratados en los espacios ínter laminares de la arcilla. Al principio, la introducción de bajas concentraciones de sal de potasio es beneficiosa en la disminución de la presión de hinchamiento debido al reemplazamiento con iones  $K^+$  de iones *menos inhibidores* (iones más hidratados en la superficie de la arcilla). Sin embargo, la presión de hinchamiento aumentará cuando un exceso de cationes y aniones hidratados con la repulsión mutua incrementada se vigoriza en los espacios ínter laminares de la arcilla.

Note que los resultados anteriores fueron obtenidos ambos para un sistema de lutita con una salmuera de alta salinidad como el único fluido entre las láminas de arcilla. Tales situaciones casi nunca ocurrirán en la práctica real de campo, donde el transporte de solutos desde el lodo hacia la lutita (por ejemplo, difusión de iones) diluye la concentración de solutos. Estos

resultados deberían por consiguiente no ser utilizados como un argumento para descartar salmueras concentradas de KCl o KCOOH como fluidos base para lodos estabilizadores de lutitas. Los resultados solo sirven para ubicar la presión de hinchamiento en una perspectiva diferente y resaltar la complejidad del fenómeno de repulsión de iones.

De lo anterior se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La presión de hinchamiento que esta siempre presente en lutitas ricas en arcilla, actuando como una fuerza de tensión sobre las láminas de la arcilla, no se desarrolla de repente cuando las lutitas se ponen en contacto con los fluidos de perforación base agua. Sin embargo, los cambios químicos causados por la interacción entre el fluido de perforación y la lutita pueden cambiar su magnitud (beneficiosamente o adversamente).
- Ni siquiera los mejores inhibidores pueden bajar la presión de hinchamiento hasta cero<sup>10</sup>, ver Figura 37; habrá siempre repulsión residual entre las láminas debido a la hidratación de las superficies de la arcilla e interferencia entre los iones hidratados y las moléculas de agua, a menos que una deshidratación completa y desprendimiento de las láminas ocurra.
- Las presiones de hinchamiento son muy altas en arcillas específicas. Así, la efectividad de los *inhibidores* en reducir la presión de hinchamiento será diferente para distintas arcillas. Por ejemplo, mientras que el potasio tiene un fuerte efecto sobre el hinchamiento de

la montmorillonita, apenas tiene un efecto sobre la illita y puede realmente incrementar el hinchamiento de la caolinita.

En el esfuerzo por estabilizar las lutitas se debería apuntar a controlar y reducir la presión de hinchamiento. Esto, sin embargo, puede no ser suficiente para garantizar la estabilidad.

#### 1.4 TRANSPORTE EN LUTITAS

Un resumen de los flujos directos y acoplados que se pueden presentar en las lutitas y sus fuerzas conductoras, están dadas en la Tabla 8. Los bien conocidos flujos directos son el flujo Darcy de agua y la difusión de solutos, manejados por gradientes hidráulicos y por gradientes de potencial químico, respectivamente, entre el fluido de perforación y la lutita.<sup>47</sup> Entre los flujos acoplados se encuentra la osmosis química, el cual es el flujo de agua manejado por gradientes de potencial químico.

Se ha mostrado que los sistemas lutita-fluido pueden actuar como *membranas osmóticas semi-permeables* que mantienen una osmosis química, la cual es el flujo de agua manejada por gradientes de potencial químico. La eficiencia de la membrana se deriva de la diferencia de movilidades que existe entre el agua y el soluto hidratado de las lutitas ricas en arcillas de matrices de baja permeabilidad. Usando fluidos de alta salinidad, es posible estimular un contra flujo osmótico del agua de poro desde la lutita hacia la cara del pozo, a fin de balancear (parcialmente) el flujo hidráulico del filtrado del lodo. Todos los flujos directos y acoplados combinados ocasionan un intercambio de agua y solutos (iones) que cambiarán *la presión de hinchamiento, el contenido de agua y la presión de poro*.

**Tabla 8**

**Resumen de Flujos en Lutitas Manejados por Diferentes Gradientes**

<b>Fuerza Flujo</b>	<b>Gradiente de Presión Hidráulico</b>	<b>Gradiente de Potencial Químico</b>	<b>Gradiente de Potencial Eléctrico</b>	<b>Gradiente de Temperatura</b>
Fluido (agua)	Convección (Ley de Darcy)	Osmosis química	Electro-osmosis	Termo-osmosis
Solutos/iones	Advección	Difusión (Ley de Fick)	Electro-porosis	Difusión térmica (Efecto Soret)
Corriente	Flujo de corriente	Difusión de corriente	Conducción eléctrica	Termo-electricidad (Efecto Seebeck)
Calor	Transferencia de calor isotérmica	Efecto Dufour	Efecto Peltier	Conducción térmica

**Fuente:** van Oort, E.: On the Physical and Chemical Stability of Shales. 2003.

Suponga que se está perforando una lutita con sobrebalance, tal que se cumple con el peso del lodo requerido para dar estabilidad mecánica. El contenido de iones del fluido de perforación excede ligeramente al del fluido de poro de la lutita. La difusión de iones desde el lodo a la lutita ocurrirá debido al gradiente de potencial químico. Por simplicidad se asume que no ocurre flujo acoplado. De lo anterior surgen los siguientes interrogantes: ¿Cómo la presión de poro de la lutita, el contenido iónico y el contenido de agua se vera después del algún tiempo?, y ¿Cómo los cambios afectarán la estabilidad?.

Contrario al comportamiento en medios permeables, la difusión es un proceso más rápido que el flujo Darcy en lutitas de baja permeabilidad. Los coeficientes de difusión de iones en lutitas están típicamente en el rango de  $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $10 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  (ver Tablas 9 y 10). Para lutitas con permeabilidad en el rango de nano-Darcy ( $k = 10^{-9} \text{ D} - 10^{-21} \text{ m}^2$ ), la difusión de ión es entonces de uno a dos órdenes de magnitud más rápido que el flujo hidráulico.

**Tabla 9**

**Coefficientes de Difusión para Iones (en Agua) y Soluciones a 77°F**

Catión	D x 10 <sup>-10</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Catión	D x 10 <sup>-10</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Soluto	D x 10 <sup>-10</sup> (m <sup>2</sup> /s)
H <sup>+</sup>	93,1	Ba <sup>2+</sup>	8,46	H <sub>2</sub> O	24,5
Li <sup>+</sup>	10,3	Cu <sup>2+</sup>	7,13	LiCl	13,66
Na <sup>+</sup>	13,3	Fe <sup>2+</sup>	7,19	NaCl	16,10
K <sup>+</sup>	19,6	Zn <sup>2+</sup>	7,02	NaBr	16,25
Cs <sup>+</sup>	20,5	Fe <sup>3+</sup>	6,07	KCl	19,93
Mg <sup>2+</sup>	7,05	Cr <sup>3+</sup>	5,94	CsCl <sub>2</sub>	20,44
Ca <sup>2+</sup>	7,92	Al <sup>3+</sup>	5,95	CaCl <sub>2</sub>	13,35

**Fuente:** van Oort, E.: Transport in Shales [...] Water-Based Shale Drilling Fluids. 1996.

Los coeficientes de difusión de los cationes en las lutitas dependen de la concentración de estos y de la permeabilidad de la lutita.

**Tabla 10**

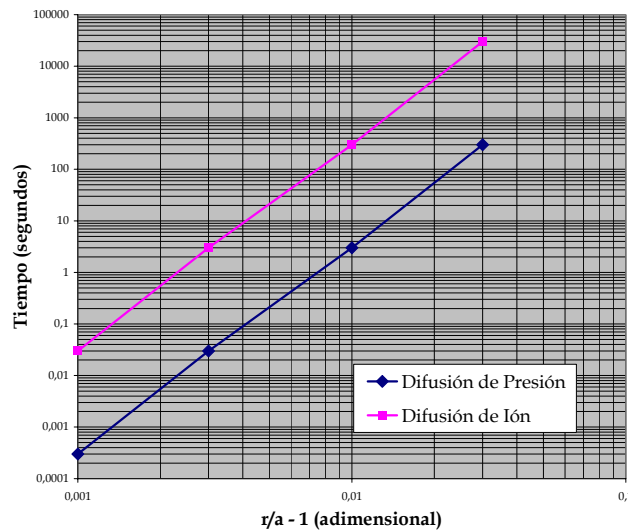
**Resultados Experimentales en Lutitas Pierre Tipo I**

Fluido de Prueba	k (nD)	Eficiencia de Membrana (%)	D <sub>catión</sub> × 10 <sup>-10</sup> (m <sup>2</sup> /s)
35% CaCl <sub>2</sub>	2,0	5,0	2,6
21% NaCl	1,9	3,8	2,9
26% KCl	2,2	2,2	1,9
72% KCOOH	1,5	7,9	1,3

**Fuente:** van Oort, E.: On the Physical and Chemical Stability of Shales. 2003.

Hay, sin embargo, otro proceso importante que toma lugar más rápido que la difusión de iones. El flujo Darcy de agua virtualmente incompresible dentro de una matriz de lutita altamente rígida tendrá un efecto profundo sobre la presión de poro. Debido a su permeabilidad fundamentalmente baja, las lutitas no pueden disipar la presión de poro lo suficientemente rápido. De este modo vemos que perforando con un lodo base agua en sobre balance se elevará con el tiempo la presión de poro cerca a la cara del pozo, como resultado de la entrada de agua.

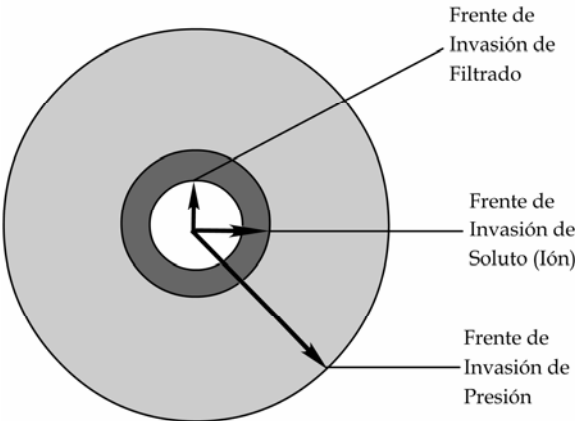
Para lutitas de baja permeabilidad, se espera que el frente de presión de poro exceda el frente de difusión de ión de uno a dos órdenes de magnitud (ver Figura 38). La situación descrita en la Figura 39 es creada, donde el frente de invasión del filtrado del lodo es precedido por un frente de difusión de ión, el cual a su vez es precedido por un frente de difusión de presión de poro. Una buena regla del dedo gordo es que donde el volumen de invasión de agua está en el rango de milímetros por día, la difusión de ión difundirá por encima de centímetros por día y la presión difundirá por encima de decímetros por día.



**Figura 38. Difusión iónica y de presión en lutitas (van Oort, 2003)**

Los iones que se difunden en las lutitas se intercambiarán en los sitios de arcilla, alterando la presión de hinchamiento. La invasión de presión de lodo elevará la presión de poro. Si la ósmosis ocurre, las lutitas pueden ser deshidratadas en las zonas cercanas a la cara del pozo. Tales cambios afectarán totalmente el estado de esfuerzo y/o la resistencia de una lutita

recientemente perforada. Estas implicaciones para la estabilidad de la cara del pozo serán discutidas en el siguiente Capítulo.



**Figura 39. Frentes de invasión alrededor del pozo (van Oort, 2003)**

## 2. ESTABILIZACIÓN DE LUTITAS

La estabilidad de las lutitas ricas en arcillas es profundamente afectada por sus complejas interacciones físicas y químicas con los fluidos de perforación. Este capítulo intenta clarificar las interacciones entre los procesos de transporte (el flujo hidráulico, ósmosis, la difusión de iones y difusión de presión), el cambio físico (la pérdida de sobre balance hidráulico debido a la presión de penetración del lodo en la presión) y el cambio químico (intercambio iónico, alteración del contenido de agua de la lutita y cambios en la presión de hinchamiento) que gobiernan la estabilidad de las lutitas. Manipular las interacciones lutita-fluido puede mejorar la estabilización de los ripios y de la cara del pozo, así como incrementar la capacidad de atravesar estas formaciones.<sup>47</sup>

### 2.1 CONDICIONES PARA LA ESTABILIDAD

La Figura 40 muestra una representación Mohr-Coulomb del estado de esfuerzo de las lutitas después de la perforación (línea punteada). Los esfuerzos verticales son esfuerzos inter-granulares, también conocidos como *esfuerzos normales efectivos*.<sup>47</sup> Estos son denotados como:

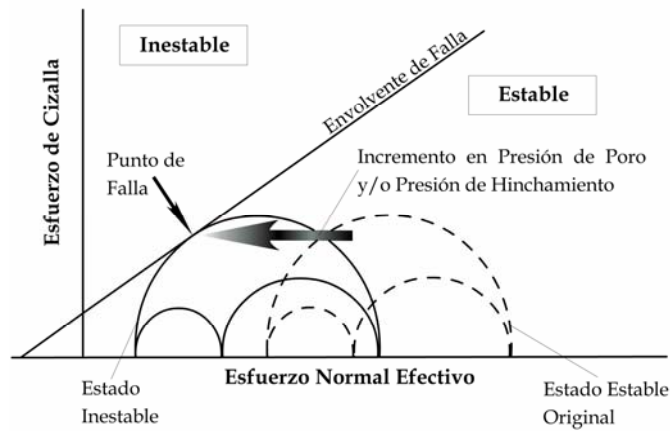
$$\sigma_i^{eff} = \sigma_i - P_{poro} - P_{hinchamiento} \quad (1)$$

Donde  $\sigma_i$  son los esfuerzos de formación in-situ (en dirección radial, tangencial y vertical) y  $P_{poro}$  y  $P_{hinchamiento}$  denota la presión de poro y la

presión de hinchamiento respectivamente. Note que la presión de hinchamiento y la presión de poro han sido completamente separadas aquí. La envolvente de falla de Mohr-Coulomb, la cual refleja la resistencia a la lutita, es definida como:

$$\tau = \sigma \tan \Phi + C \quad (2)$$

Donde  $\tau$  representa el esfuerzo de cizalla,  $\Phi$  es el ángulo de fricción y  $C$  denota cohesión. Se asume que la lutita es estable inicialmente después de la perforación, significando que los esfuerzos aplicados, presión de poro, esfuerzos de hidratación y fuerzas de cementación son todas balanceadas en la lutita y no superan su resistencia.



**Figura 40. Representación Mohr-Coulomb** (van Oort, 2003)

Esto requiere en primer lugar de la resistencia radial adecuada sobre las paredes del pozo, es decir, el correcto peso del lodo. Si el peso del lodo es demasiado bajo, entonces una tensión inmediata (local) o falla ocurrirá. Por otro lado, un fracturamiento /Tensile fracturing/ puede ocurrir si el peso del lodo es demasiado alto. Note que tales fallas locales no son dependientes del

tipo de lodo (ya sean ellos base aceite, sintéticos o base agua), sino que se deben únicamente a la magnitud del peso del lodo. El peso del lodo es por tanto la principal herramienta de disposición del perforador para garantizar la estabilidad inicial de la lutita. Sin embargo, teniendo el adecuado peso del lodo inicialmente no es necesariamente una garantía de estabilidad todo el tiempo, como veremos.

Hay básicamente 3 mecanismos por los cuales la exposición al fluido de perforación puede conllevar a la inestabilidad de las lutitas con el tiempo. Estos son:

- Elevación de la presión de poro debido a la presión de invasión del lodo, reduciendo los esfuerzos efectivos.
- Elevación de la presión de hinchamiento, el cual puede ser debido al desfavorable intercambio catiónico en los sitios de las arcillas, reduciendo los esfuerzos efectivos.
- Alteración química y debilitamiento de los enlaces de cementación. Este efecto no puede ser considerado en la presente representación de esfuerzos efectivos. Puede tenerse en cuenta ajustando la resistencia de la lutita y los parámetros de falla (cohesión y ángulo de fricción), cambiando así la posición y la pendiente de la envolvente de la falla con el tiempo.

Entonces, una situación más estable puede surgir cuando la presión de poro o esfuerzos de hidratación son reducidos, o si la alteración química fortalece la lutita.

La Figura 40 muestra que le ocurre al estado estable inicial cuando los esfuerzos efectivos son reducidos con el tiempo: el estado de esfuerzo se moverá hacia la envolvente de falla hasta que por un punto específico alrededor de la cara del pozo (es decir, una combinación específica entre el esfuerzo normal y el de cizalla) la envolvente sea alcanzada y ocurra falla (línea continua). Para mantener la estabilidad, hay solo una opción disponible: Incrementar el peso del lodo con el fin de cambiar el estado de esfuerzo (es decir, mover el círculo de Mohr de regreso hacia la derecha) y mantener el hueco abierto. Esto, sin embargo, es un arreglo temporal mientras el proceso que esta reduciendo el esfuerzo efectivo continuará moviendo el estado de esfuerzo hacia la falla. Además, el incremento progresivo del peso del lodo eventualmente desgastara el margen disponible de perforación (diferencia entre el gradiente de fractura y el peso del lodo requerido para el control del pozo y de la estabilidad de la cara del pozo), finalmente llevando a exceder el gradiente de fractura, ocasionando un fracturamiento de la formación y la pérdida de lodo.

En este punto surge la siguiente pregunta: ¿Puede la elevación de la presión de poro debida a la presión de penetración del lodo ser compensada mediante la disminución de la presión de hinchamiento en una cantidad equivalente usando los inhibidores adecuados?, es decir: ¿Pueden los aditivos de lodos inhibidos ser utilizados efectivamente para prevenir los problemas de lutita, y de ser así, que clase de aditivos?.

Revisando la Ecuación 1, se podría pensar que un incremento en la  $P_{\text{poro}}$  puede ser balanceado mediante una reducción en la  $P_{\text{hinchamiento}}$ .

Teniendo en cuenta los argumentos sobre el transporte, la respuesta a la pregunta anterior se explica en que hay casos en los cuales la inestabilidad de las lutitas no puede ser prevenida sin importar que clase de inhibidores sean utilizados (observe que los inhibidores fueron definidos como agentes que reducen la presión de hinchamiento). La razón para esto es que en lutitas intactas, no fracturadas, el frente de difusión del inhibidor se retrasa con respecto al frente de presión de poro. Como se mostró en las Figuras 38 y 39, la inestabilidad no puede ser prevenida en la zona con elevada presión de poro (entre el frente de invasión de soluto y el frente de invasión de presión) mientras el inhibidor no haya alcanzado esta zona todavía. Asumiendo que la presión de poro haya sido equilibrada a la presión del lodo (es decir,  $P_{\text{poro}}=P_{\text{lodo}}$ ) en la zona de invasión de presión, no alcanzada todavía por la difusión del inhibidor, el esfuerzo radial efectivo ( $\sigma_r^{eff}$ ) actuando en esta zona llega a ser:

$$\sigma_r^{eff} = -P_{\text{hinchamiento}} \quad (3)$$

Lo cual significa que la presión de hinchamiento nativa total, que no ha sido aún atenuada por los inhibidores porque están retrasados, está actuando en tensión sobre la estructura de la arcilla. Sin embargo, aun cuando los inhibidores podrían estar presentes, la presión de hinchamiento no sería disminuida hasta cero, debido a que habrá siempre una fuerza de tensión efectiva remanente. Cuando esta fuerza de tensión neta sobrepasa la resistencia de tensión de la lutita (la cual es normalmente baja en cualquier lutita) un debilitamiento será inminente en los sitios menos consolidados de esta zona, produciendo subsecuentemente una falla a gran escala.

Particularmente nocivo a este respecto son las fluctuaciones de presión anular (por ejemplo, durante eventos de suaveo y surgencia) las cuales, mediante el cambio del soporte radial hidráulico, puede terminar de desestabilizar una lutita ya debilitada e hinchada, fallando el material y desalojando fragmentos de lutitas desde las paredes de la cara del pozo.

El retraso en el transporte de los inhibidores es considerado como una de las principales razones que limitan su función como estabilizador de lutitas. La inhibición solo será efectiva si la presión de penetración del lodo y la difusión del inhibidor pueden ir de la mano, y si la naturaleza de la lutita y del agente inhibidor son tales que la presión de hinchamiento pueden verdaderamente ser reducidas a tal grado que compense el incremento de la presión de poro. Note que tales condiciones solo serán satisfechas para lutitas con cantidad significativa de arcillas hinchables tales como las esmectitas. Para arcillas de baja o nula reactividad tales como la caolinita, los inhibidores casi nunca proveerán alguna solución, esto explica por qué los lodos inhibidos tienen históricamente un pobre desempeño cuando se usan en la perforación de tales arcillas.

Se concluye que una estrategia para estabilización de lutitas basada solamente en el uso de inhibidores puede ser parcialmente satisfactoria. Claramente, para estabilizar lutitas la experiencia de campo muestra que se requiere algo más que inhibición.

La prevención de la entrada de filtrado del lodo en la lutita y por ende de la presión de penetración del lodo en las lutitas, posee la clave para la estabilización de ellas. La metodología para lograr la estabilidad físico-química de las lutitas y de la cara del pozo es como sigue:

- Aplicar el esfuerzo de soporte radial a las paredes del pozo mediante el uso de un adecuado peso del lodo para alcanzar estabilidad mecánica. Sin el peso del lodo apropiado, cualquier formación puede ceder y fallar sin importar que sistema de lodo sea utilizado.
  
- Mantener este apoyo radial con el tiempo, previniendo la invasión del filtrado del lodo y el aumento de la presión de poro mediante:
  - La reducción de la permeabilidad de la lutita, por ejemplo, mediante el bloqueo de las gargantas de poro.
  - El aumento de la viscosidad del filtrado, y en consecuencia la reducción del flujo hidráulico desde el lodo hacia la lutita. Esto se logra con viscosificantes de bajo peso molecular (ver Tabla 11).
  - El equilibrio del flujo hidráulico desde el lodo hacia la lutita mediante un contra-flujo /backflow/ osmótico inducido desde la lutita al lodo.
  
- Intentar mejorar la estabilidad mediante:
  - La estimulación del backflow osmótico del fluido de poro para reducir el contenido de agua de la lutita cerca a la cara del pozo y la presión de poro, de manera que la resistencia y el esfuerzo efectivo se incrementen.
  - El uso de solutos en el fluido de perforación que tengan la habilidad de difusión en la lutita, intercambio en las láminas de arcilla y reducción efectiva de la presión de hinchamiento.

- El uso de solutos en el fluido de perforación que invadan las lutitas y reaccionen químicamente con los componentes de ellas, incrementando las fuerzas de cementación.

**Tabla 11**  
**Viscosidades de Sustancias de Bajo Peso Molecular y del KCl**  
**Relativas a la Viscosidad del Agua**

Aditivo		CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	NaCOOH	KCOOH	Glucosa	Sacarosa	Glicerol	KCl
% w/w	T	68°F	68°F	77°F	77°F	68°F	68°F	68°F	68°F
5		1,16	1,24	1,13	1,16	1,14	1,14	1,13	0,99
10		1,32	1,57	1,46	1,19	1,33	1,33	1,29	0,99
15		1,56	2,07	1,71	1,26	1,56	1,59	1,48	1,00
20		1,93	2,86	2,06	1,36	1,90	1,94	1,73	1,01
25		2,5	4,27	2,52	1,46	2,33	2,43	2,05	1,05
30		3,46	7,00	3,46	1,60	2,94	3,18	2,41	-
40		8,98	-	6,26	1,99	5,48	6,15	3,65	-
50		-	-	-	2,67	11,9	15,4	5,95	-
60		-	-	-	3,74	37,5	58,5	8,33	-
70		-	-	-	8,82	-	481	-	-

Fuente: van Oort, E.: A Novel Technique for [...] Induced Borehole Instability in Shale. 1994.

## 2.2 PROBLEMAS DE LUTITAS Y SOLUCIONES

Tres tipos de problemas de lutitas y sus soluciones únicas son ahora discutidas: la desintegración de los ripios, la inestabilidad de la cara del pozo y el embolamiento de la broca. Desde el punto de vista de la ingeniería de lodos, el reto es diseñar una estrategia de fluido de perforación completa que satisfaga los requerimientos para solucionar los problemas mencionados al mismo tiempo.<sup>47</sup>

**2.2.1 Desintegración de los Ripios.**<sup>47</sup> La Figura 41 muestra los efectos de la perforación sobre el sistema de la lutita. Con el desprendimiento de los ripios

desde la matriz de la roca, los esfuerzos in-situ son repentinamente removidos y reemplazados por la presión del lodo uniforme. Una presión particular o esfuerzo radial efectivo actuará sobre los ripios, y está dada por:

$$\sigma_r^{eff} = P_{lodo} - P_{poro} - P_{hinchamiento} \quad (4)$$

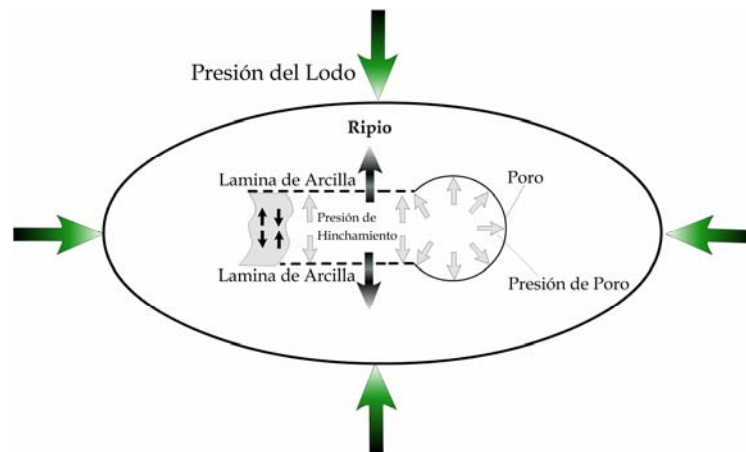
Note que este esfuerzo o presión que está actuando sobre la cementación de los ripios estará en compresión cuando la presión del lodo exceda la combinación de la presión de poro y la presión de hinchamiento, pero cambiará a tensión si esta última combinación excede la presión del lodo. Una falla local directa en los sitios débiles dentro de los ripios acompañada de hidratación y dispersión puede ocurrir si los esfuerzos vencen la resistencia de la tensión de la lutita.

Asumiendo que la presión del lodo y la cementación de los ripios son capaces de controlar la falla y dispersión inicialmente, es decir, después de perforar todo está bien. La presión del lodo puede invadir el ripio y equilibrar su presión de poro con el tiempo, pero esto es un proceso relativamente lento el cual no alcanzara su total efecto si los ripios son rápidamente circulados fuera del pozo.

Un problema más grande es la reducción en la presión hidrostática (es decir, reducción en la presión del lodo) experimentada por los ripios durante su viaje por el anular.

Esta disminución en la fuerza de compresión que actúa sobre los ripios reduce el esfuerzo sobre la presión de hinchamiento, la cual ahora puede

vencer la resistencia de la cementación y separar las láminas de arcilla debido el arrastre del agua desde el lodo. El material perderá su integridad a medida que el agua invade radialmente el interior, creando un tipo de unión de interior seco y duro, y cáscaras exteriores progresivamente más suaves de material más disperso.



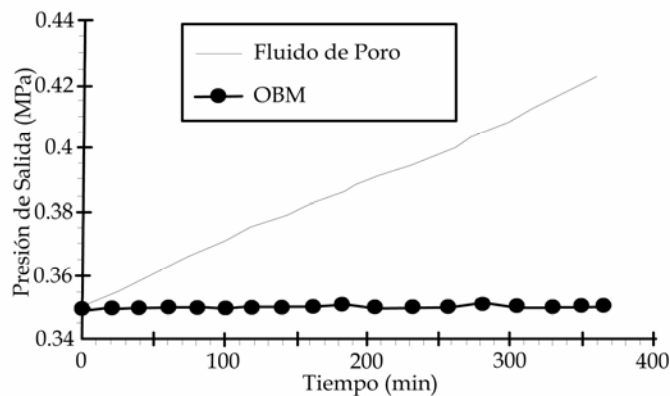
**Figura 41. Presiones actuando sobre los ripios** (van Oort, 2003)

Hay esencialmente dos soluciones para la inestabilidad de los ripios:

- Inhibición y encapsulamiento. Los inhibidores han sido aplicados con buenos resultados en la estabilización de los ripios, la cual es usualmente alcanzada por la acción combinada de estos con un polímero encapsulador (el término puede no ser enteramente preciso debido a que difícilmente pueda haber una real encapsulación de los ripios) que pueda mantener unido el material de la arcilla, evitando su desintegración. El asunto es tratado con más detalle en la discusión sobre lodos salados/PHPA de la siguiente sección.

- Impedir la entrada de agua mediante el aumento de la viscosidad del filtrado, bloqueando el poro, o estimulando el backflow osmótico del fluido del poro. La idea es simple: cuando no hay agua disponible para satisfacer la demanda de la presión de hinchamiento, no habrá hinchamiento y desintegración (lo cual es esencialmente la manera en que los lodos base aceite y sintéticos estabilizan los ripios. además, en estos lodos la invasión de volumen de lodo dentro la lutita es prevenida por presiones capilares, las cuales no permiten que el lodo base aceite penetre la lutita y por tanto evita completamente la invasión de la presión de penetración del lodo (a menos que la sobrepresión sea tan grande como 5 - 10 MPa)<sup>21</sup> como se ve en la Figura 42 donde se muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F).

Preferiblemente, estas soluciones deberían actuar en paralelo para maximizar el efecto estabilizador sobre los ripios.



**Figura 42. Transmisión de presión para un lodo base aceite (van Oort, 1994)**

**2.2.2 Inestabilidad en las Paredes del Pozo.** La estabilidad de los ripios y las lutitas han sido históricamente estudiados como el mismo problema. Sin embargo, hay diferencias esenciales que necesitan un tratamiento separado para la inestabilidad en las paredes del pozo. Dos de estas diferencias son:

- Las condiciones de los esfuerzos in-situ y los efectos geométricos.
- El tiempo. Normalmente, la cara del pozo está expuesta por mucho más tiempo a los fluidos de perforación que los ripios, a no ser que estos últimos no sean limpiados eficazmente fuera del hueco. Como el transporte actúa con el tiempo, diferentes modos de fallas son encontrados.

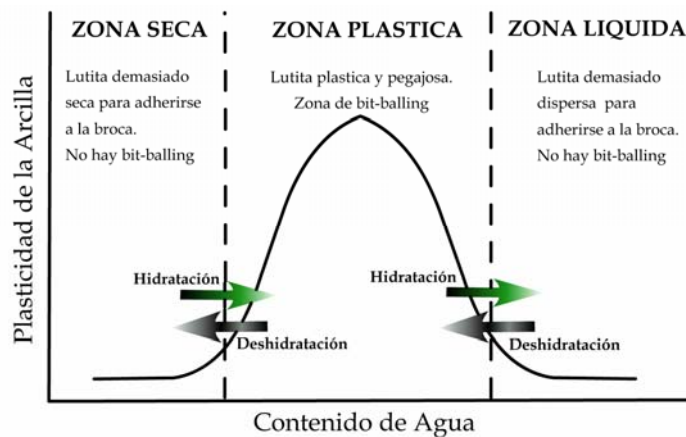
La estrategia para garantizar la estabilidad de la cara del pozo fue expuesta en la sección anterior.

**2.2.3 Embolamiento de la Broca.** El bit balling afecta fuertemente la tasa de penetración (ROP) y la habilidad para perforar el pozo, que paralelamente afectan los costos de perforación. A pesar de su obvia importancia, es aún un fenómeno poco entendido que usualmente se corrige por prueba y error mediante aditivos empíricamente probados para mejorar la ROP. Ofrecer maneras de minimizar el bit balling y maximizar la ROP se logra a través de un mejor diseño del lodo base agua.

Después de la perforación, los esfuerzos experimentados por los ripios están dados por la Ecuación 4. Los esfuerzos liberados pueden inmediatamente activar la hidratación. La presión de hinchamiento es como una fuente de descarga que necesita de agua para el efecto de separación de las láminas de arcilla. Los ripios atraerán agua de cualquier fuente disponible, la cual puede

ser de las capas de agua sobre la superficie de acero de la broca o agua de ripios vecinos. Los ripios están justo en un contacto cercano después de la perforación debido a los espacios de la broca relativamente pequeños y a la acción de amasamiento mecánico de esta. Tomando agua hacia su interior, los ripios pueden adherirse sobre la broca y sobre ellos mismos, causando que la broca se embole. La probabilidad de que estos ripios vayan a permanecer adheridos a la broca, y al BHA, dependerá de su solidez y plasticidad, lo cual es una función de los contenidos de agua y de arcilla. El concepto de plasticidad de la arcilla es bien conocido de la mecánica de suelos, donde es convenientemente tomado en términos del así llamado límites de Atterberg.

Incrementando el contenido de agua de una arcilla inicialmente seca conllevará primero a una zona seca por debajo del *límite plástico* (ver Figura 43).



**Figura 43. Modelo para el embolamiento de la broca (van Oort, 2003)**

En esta zona, el material está demasiado seco como para tener una tendencia significativa a adherirse. Por encima del límite plástico, a contenidos de agua más altos, la tendencia a adherirse incrementa rápidamente. Si el contenido de agua es incrementado aun más, el *límite líquido* es alcanzado tal que el

material tiene una resistencia inherente muy limitada y se dispersará. El material puede rápidamente ser removido de la broca mediante la agitación producida por la circulación del fluido. En el gráfico, se observa que hay una clara zona de peligro para el embolamiento de la broca y del BHA: la zona plástica, a contenidos de agua intermedios. La posición de esta zona dependerá del tipo de lutita, de su contenido y tipo de arcilla específico, y por lo tanto de su presión de hinchamiento.

Si una lutita con tendencia a embolamiento pronunciado es perforada, se debería diseñar el fluido de perforación de manera que:

- Los ripios sean deshidratados, tal que ellos sean llevados de la zona plástica a la zona seca por lo cual su tendencia a adherirse desaparece. Esto puede ser logrado mediante el uso de un sistema de lodo que pueda crear membranas y que osmoticamente pueda deshidratar la lutita. La electro-ósmosis (el flujo de agua de poro de la lutita es estimulado por un potencial negativo aplicado a la broca, ver Tabla 8) de manera similar minimiza el bit balling y mejora la ROP.
- Los ripios sean hidratados, tal que ellos entren a la zona líquida, se dispersen y sean fácilmente removidos de la superficie de la broca. Esto puede ser logrado usando un sistema de lodo disperso. Note que estos sistemas pueden generar problemas tanto en la estabilidad del pozo como en la reología del lodo debido a su tendencia de dispersar los sólidos.
- Los ripios sean encapsulados (por ejemplo, humedecer con aceite) para evitar que se unan y luego se adhieran sobre la superficie de acero de

la broca. Viejas prácticas de campo usaron lodos sintéticos o con bajo porcentaje de aceite para vencer los problemas de embolamiento. Más recientemente, aditivos especiales que mejoran la ROP han sido desarrollados para que se pueda humedecer benéficamente los ripios y la superficie del acero, y ayuden a romperlos en hebras (por ejemplo, los típicos ripios en cintas generados por brocas PDC /Polycrystalline Diamond Cutlers/) que faciliten su remoción.

Especial cuidado se debe tener para los dos primeros métodos; pueden solo ser aplicados confiadamente si el contenido de agua y la tendencia a adherirse de la lutita es conocido de antemano, es decir, uno podría aplicar típicamente estas estrategias cuando hay un problema de embolamiento aparente y se conoce que la lutita perforada está en la zona plástica. De lo contrario:

- Usando el método de hidratación de ripios, se puede pasar de la zona seca hasta la zona plástica, de este modo creando un problema de embolamiento de la broca. Esta situación puede ocurrir en campo cuando lutitas bien consolidadas, de baja reactividad son perforadas con lodos dispersos (como los de base lignosulfonatos).
- Usando el método de deshidratación de ripios, se puede pasar de la zona líquida hasta la zona plástica, creando nuevamente un problema. Esta situación puede ocurrir en campo cuando lutitas jóvenes altamente reactivas son perforadas con lodos muy inhibidos o lodos con fuerte tendencia a deshidratación osmótica.

Además de lo anterior hay otros factores que juegan un rol importante en la prevención de los problemas de bit balling y deben tenerse en cuenta, entre ellos están el peso sobre la broca, la rotación de la broca, la hidráulica, el espacio libre disponible alrededor de la broca para los ripsos removidos, la agudeza y acabado de los cortadores PDC.

## **2.3 ADITIVOS DE ESTABILIZACIÓN DE LUTITAS**

Ahora que el marco para el comportamiento de las lutitas, sus interacciones con los fluidos de perforación base agua y los problemas que se derivan de estas interacciones han sido delineados, se puede empezar a describir la acción de los aditivos específicos utilizados por toda la industria para la estabilización de las lutitas. El número de estabilizadores de lutita comerciales es impresionante; en vez de discutir cada uno de ellos individualmente serán agrupados genéricamente.<sup>47</sup>

### **2.3.1 Sales.**

**2.3.1.1 Cloruro de Potasio.**<sup>47</sup> El Cloruro de Potasio (KCl) es probablemente el inhibidor mejor conocido en la industria petrolera. Su popularidad se deriva principalmente de su habilidad de disminuir la presión de hinchamiento en las arcillas esmectitas. Ha sido por esto aplicado muy efectivamente en la perforación de lutitas jóvenes y reactivas tipo *gumbo* las cuales contienen grandes cantidades de estas arcillas.

Para la concentración utilizada<sup>21</sup> del KCl se debe tener especial cuidado, ya que esta depende de la actividad de la lutita. Concentraciones demasiado altas pueden aumentar la posibilidad de problemas de inestabilidad al

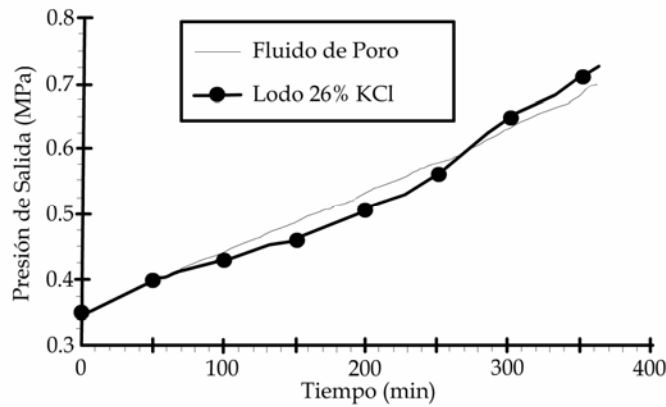
generarse eventualmente esfuerzos tensiles, es decir, aumenta la presión de hinchamiento. Por lo tanto, para cada caso en particular, existe una concentración óptima de KCl. Además, junto con el PHPA /Partially Hydrolyzed Polyacrylamide/ es formado un sistema, el cual es altamente eficaz estabilizando los ripios.

El principal defecto en el desempeño del KCl es su inhabilidad para prevenir la invasión del filtrado y la presión de penetración del lodo en las lutitas. Las viscosidades de las soluciones de KCl son cercanas a las del agua, aún a niveles de saturación de sal. El KCl no puede tapar la garganta de los poros o modificar la permeabilidad de la lutita. Por esto, la conductividad hidráulica que gobierna la magnitud del Flujo Darcy dentro de las lutitas es inalterada por el KCl.

La Figura 44 muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión para un lodo saturado de KCl, realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F. Note que la tasa de transmisión de presión es la misma que para la curva estándar del fluido de poro, es decir, el KCl de ninguna manera retarda la presión de penetración del lodo.

Además, la presión osmótica generada por las soluciones concentradas de KCl son moderadas (típicamente <20 MPa) y la eficiencia de las membranas son bajas (típicamente entre 1-2%) debido a la movilidad relativamente alta del KCl en la lutita. Por esto, el contra flujo osmótico del fluido de poro de la lutita inducido mediante lodos KCl (con presiones osmóticas efectivas en el rango 0,1 - 1,0 MPa) serán despreciables. Como resultado, los sistemas de lodo KCl usualmente no son adecuados para perforación de lutitas más antiguas y menos reactivas. Primero, la difusión del ión está retrasada

respecto de la difusión de presión del lodo. Segundo, estas lutitas han pasado por un proceso de diagénesis el cual ha cambiado las esmécticas a arcillas menos hinchables tales como las ilitas. Consecuentemente, hay menos presión de hinchamiento en estas lutitas para que el KCl actúe. Estas lutitas típicamente fallaran debido a los efectos de la presión de penetración del lodo en la exposición prolongada a la invasión del filtrado del lodo.



**Figura 44. Transmisión de presión para un lodo KCl (van Oort, 1994)**

En conclusión, el KCl es recomendado principalmente para la estabilización de las lutitas relativamente jóvenes y más reactivas, las cuales contienen cantidades significativas de esmectitas.

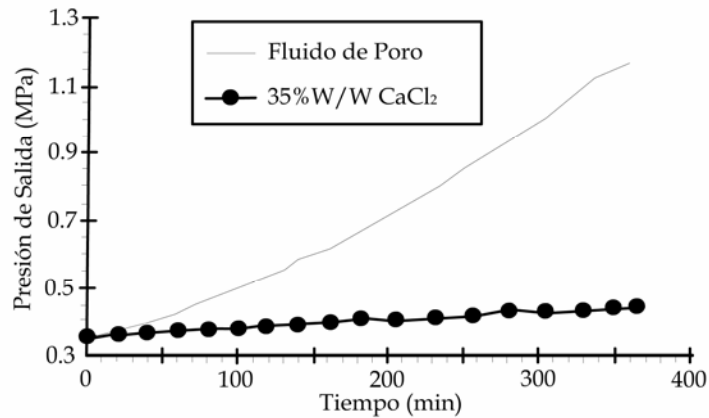
**2.3.1.2 Cloruro de Sodio.**<sup>47</sup> El ión  $\text{Na}^+$  no es tan *inhibidor* como el  $\text{K}^+$ . El uso de Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ ) para el control de las lutitas, sin embargo, tiene ciertas ventajas sobre el uso de KCl. Soluciones de  $\text{NaCl}$  cercanas a la saturación tienen una viscosidad elevada y actividades de agua más bajas que soluciones concentradas de KCl, dando lugar a presiones osmóticas más altas. Por consiguiente, son más adecuadas para reducir la invasión del filtrado en las lutitas. Aunque soluciones concentradas de  $\text{NaCl}$  no hacen un buen lodo

para lutitas por si solos, ellos son muy efectivos cuando trabajan en combinación con sistemas que pueden mejorar la eficiencia de la membrana de la lutita (tal como los silicatos, polioles y metilglucósido) mediante el suministro del gradiente osmótico para la deshidratación de la lutita.

**2.3.1.3 Cloruros y Bromuros de Calcio/Magnesio/Zinc.**<sup>47</sup> Salmueras concentradas de  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaBr}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgBr}_2$  y  $\text{ZnBr}_2$  son comunes como fluidos base para fluidos de perforación y completamiento de alta densidad y bajo contenido de sólidos. Dos factores que los hacen adecuados para la perforación de las lutitas son:

- Sus viscosidades de filtrado son altas, las cuales disminuirán el flujo hidráulico (ver Figura 45).
- Pueden generar presiones osmóticas muy altas (en el orden de 1000 MPa; sin embargo, la eficiencia de membrana esta en el orden de 1 - 10 % así que la presión osmótica efectiva que actúa es atenuada hasta 10 - 100 MPa) que pueden ser utilizadas para compensar parcialmente el desequilibrio hidráulico del lodo.

Sin embargo, estos iones divalentes se difundirán dentro de la lutita puesto que la membrana está resquebrajada y permite el transporte del ión desde el lodo a la lutita. Cuando estos iones reemplazan a iones más inhibidores tales como el  $\text{K}^+$  en los sitios de las arcillas, entonces la presión de hinchamiento puede incrementar, conllevando a la inestabilidad de la lutita. Cuando estos lodos son utilizados, se debería balancear cuidadosamente su efecto favorable sobre el contenido de agua de la lutita y la presión de poro, y su efecto potencialmente perjudicial sobre la presión de hinchamiento.



**Figura 45. Transmisión de presión para un lodo CaCl<sub>2</sub> (van Oort, 1994)**

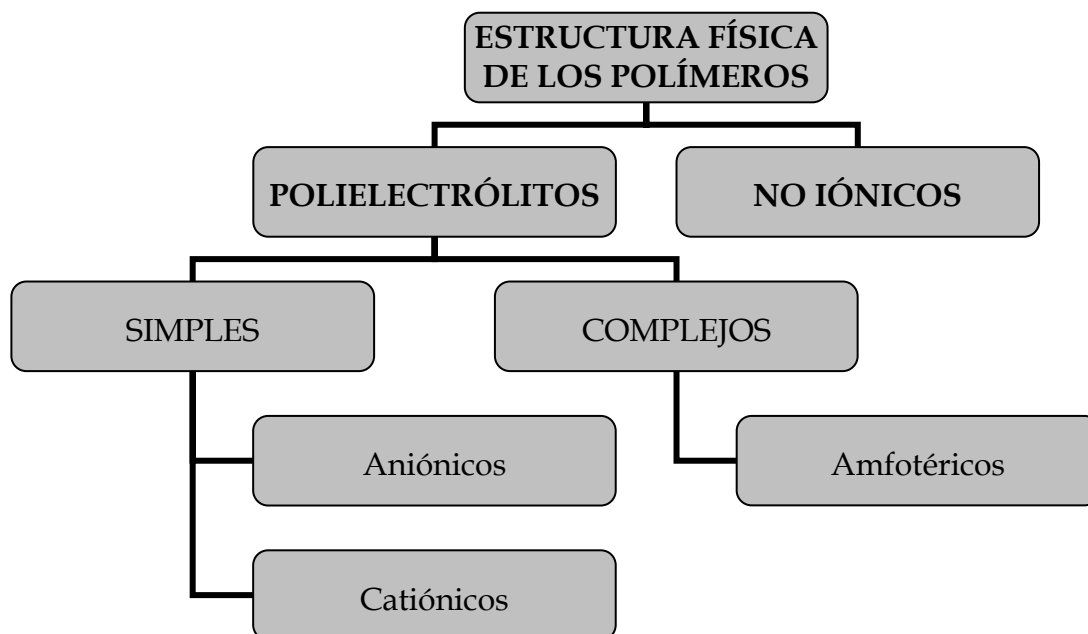
La Figura 45 muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión para un lodo CaCl<sub>2</sub>, realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F. Soluciones concentradas de estas sales aumenta la viscosidad del filtrado del lodo, evitando así la invasión de la presión de penetración del lodo.

**2.3.1.4 Sales de Acetato y Formiato.** Lo anterior también aplica en gran parte para salmueras de acetato y formiato concentradas (MCH<sub>3</sub>COOH y MCOOH; M=Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>), cuya viscosidad de filtrado son altas y generan presiones osmóticas muy grandes. Estos sistemas de sal monovalentes, sin embargo, pueden tener un efecto más benéfico sobre la presión de hinchamiento. Especialmente el Formiato de Potasio (KCOOH) parece ser especialmente más conveniente para perforar lutitas por la reducción de la presión de hinchamiento, el contenido de agua de la lutita y la presión de poro al mismo tiempo lo cual es soportado por la experiencia de campo. Note que el beneficio antes mencionado solo será obtenido por soluciones de sales altamente concentradas.

**2.3.2. Polímeros con Afinidad Especial hacia las Lutitas.**<sup>47</sup> El hecho de que los iones  $K^+$  puedan ser intercambiados en un solo sitio de la arcilla fue percibido como una desventaja que puede ser remediada usando un polímero con grupos funcionales que se adsorben sobre la superficie de la arcilla en múltiples sitios. Tales polímeros de *anclaje* múltiple pueden ser mucho más resistentes al intercambio que un solo catión de  $K^+$ . También, la legislación ambiental prohíbe el uso del KCl en diferentes áreas de perforación en el mundo, ya sea por la sensibilidad ambiental al potasio (Golfo de México; costa afuera) o a los cloruros (Canadá, Tailandia, etc.).

La argumentación dada para la acción del KCl esencialmente también se mantiene para estos polímeros. Ellos son buenos inhibidores del hinchamiento de las arcillas, especialmente aquellos de bajo peso molecular (< 10,000 u.m.a.) que puedan atravesar el sistema poroso y penetrar en la estructura de la arcilla. Las especies de alto peso molecular (> 10,000 u.m.a.) habrán perdido esta habilidad de penetrar lutitas y modificar la presión de hinchamiento debido a las restricciones de tamaño, pero ellas pueden sellar las superficies externas de la lutita.

Los polímeros solubles en agua se pueden clasificar según su estructura física, la cual es relacionada con la naturaleza eléctrica del polímero. En este sentido algunos polímeros no tienen carga eléctrica y son llamados *No Iónicos*. Otros están cargados y se asemejan a electrolitos, estos son llamados *Polielectrólitos*. En el siguiente esquema se observa la clasificación de los polímeros solubles en agua de acuerdo a su estructura física:



**Figura 46. Clasificación física de los polímeros** (Moreno & Vásquez, 1989)

Los grupos funcionales tales como los alcoholes, las amidas y los grupos éteres son representativos de los grupos *No Iónicos*, los cuales le dan solubilidad en agua a los polímeros. Estos se reconocen por la estructura molecular mostrada a continuación:

Alcohol:  $\text{R} - \text{OH}$

Amida:  $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R} - \text{C} - \text{NH}_2 \end{array}$

Éteres:  $\text{R} - \text{O} - \text{R}$

Dichos grupos funcionales son completamente hidrofílicos, por consiguiente atraen agua. Sin embargo, no se ionizan. Por lo tanto, producen poca o ninguna carga eléctrica y su solubilidad en agua no se vera afectada por la

resistencia iónica o el contenido electrolítico. La HEC (Hidroxietilcelulosa) y los PVA (Alcoholes polivinílicos) son considerados polímeros *No Iónicos*, aunque el primero ya poco es utilizado como estabilizador de lutitas y los PVA solo se aplican a condiciones específicas (Mar del Norte). Finalmente, también todos los polioles (incluyendo los poligliceroles y los poliglicoles) y azúcares (especialmente los glucósidos) se encuentran entre estos polímeros *No Iónicos* los cuales serán tratados por separado más adelante.

Los *Polielectrólitos* tienen grupos funcionales los cuales se ionizan en agua y el tipo de carga desarrollada determina su utilidad. Si el polielectrólito contiene solo un tipo de grupo funcional, este es un polielectrólito simple. Si hay más tipos de grupos funcionales, este es complejo. A continuación veremos las características más fundamentales de cada uno de estos tipos de *Polielectrólitos*.

**2.3.2.1 Polímeros Anfotéricos.**<sup>41</sup> Los aditivos anfotéricos actualmente disponibles exhiben características de inhibición de lutitas tanto de aditivos catiónicos como de aniónicos. Entre las ventajas sobre los sistemas catiónicos se encuentran sus bajos costos (tanto de los costos iniciales de los materiales anfotéricos como las reducidas tasas de consumo) y su naturaleza esencialmente no tóxica. Adicionalmente, los anfotéricos son generalmente compatibles completamente con los aditivos aniónicos comunes, por ende se va extendiendo su uso a aplicaciones de más altas temperaturas que las posibles con los sistemas catiónicos actualmente disponibles.

Los materiales anfotéricos se creen que funcionan con un mecanismo similar al que opera para materiales catiónicos. Sin embargo debido a su naturaleza anfotérica, sus características catiónicas y por tanto inhibidoras son un poco

menos intensas que aquellas exhibidas por los materiales verdaderamente catiónicos, particularmente a valores de pH altos. Sin embargo, con una correcta atención a la aplicación y al pH, estos tipos de materiales han sido empleados muy exitosamente para la inhibición de lutitas.

Como ejemplo de este tipo de materiales se encuentran los *Poli-amino Ácidos*<sup>38</sup>, los cuales fueron introducidos en 1993 y son simplemente una combinación de aminas y ácidos carboxílicos. El químico es compatible con aditivos de lodo tanto catiónicos como aniónicos. Este material anfotérico ha sido utilizado ampliamente en Canadá, Sur América y en el este de Europa. El tamaño molecular pequeño y la característica anfotérica hacen que estos poli-amino ácidos sean utilizados especialmente como supresores de hidratación de arcillas en fluidos de perforación. Las arcillas en las lutitas y en arenas permeables pueden ser estabilizadas con este tipo de aditivos.

**2.3.2.2 Polímeros Funcionalmente Catiónicos.**<sup>41</sup> Se ha comprobado que los polímeros catiónicos son bastante inhibidos en lodos base agua. Los polímeros catiónicos inhibidores teóricamente funcionan mediante la adsorción sobre la superficie negativamente cargada de las arcillas. Esta adsorción parece ser manejada por un consistente mecanismo: una reacción de intercambio catiónico, a través de la cual los cationes intercambiables en las láminas de los minerales arcillosos son reemplazados por el aditivo catiónico. Esta reacción une electrostáticamente las láminas de arcilla, reduciendo enormemente la tendencia de los minerales de arcilla a imbibir agua e hincharse y/o dispersarse en ambientes acuosos.

Esto, consecuentemente, minimiza los problemas de perforación asociados con tal hinchamiento y dispersión. Desafortunadamente, los costos (altos

costos de los polímeros catiónicos junto con las altas tasas de consumo de estos) y las consideraciones toxicas han casi impedido el uso de los sistemas de polímeros catiónicos en muchas situaciones de perforación. El uso de los polímeros catiónicos es además complicado por el hecho que estos polímeros generalmente reaccionan con los aditivos aniónicos comúnmente utilizados, tales como PAC (Celulosa Poli Aniónica), PHPA, lignosulfonatos, etc., convirtiendo tanto los materiales catiónicos como los materiales aniónicos en inefectivos.

Todos los OCM /Organic Cationic Materials/ se encuentran dentro de este grupo, incluyendo los *Polímeros Catiónicos Cuaternarios* y las *Hidroxiaminas Cuaternarias*.<sup>38</sup> Los *Polímeros Catiónicos* son de alto peso molecular, y por lo tanto tienen un gran tamaño molecular y no pueden penetrar las láminas de arcilla tan efectivamente como los monómeros de bajo peso molecular como las *Hidroxiaminas Cuaternarias*. Como resultado, la adsorción de los polímeros de alto peso molecular ocurre principalmente sobre la superficie exterior de la lutita o ripios como una capa encapsulante. Consecuentemente, la adsorción de los cationes intercambiables y la reducción de la capacidad de intercambio catiónico es menos significativa comparado con los materiales de bajo peso molecular. En los materiales catiónicos de bajo peso molecular, los cuales pueden ser considerados como supresores de hidratación más que como encapsuladores catiónicos, el catión puede fácilmente penetrar los poros de la lutita y actuar como un sustituto del potasio a concentraciones relativamente bajas.

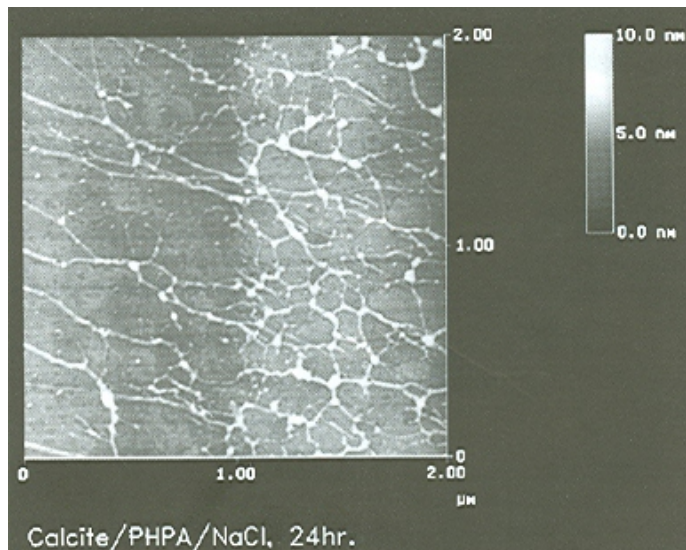
**2.3.2.3 Polímeros Funcionalmente Aniónicos.**<sup>41</sup> A estos aditivos no les han sido comprobado que exhiban las características inhibitoras de lutitas que tienen los aditivos catiónicos y anfotéricos. Ellos han sido, sin embargo,

utilizados con varios grados de éxito en muchas operaciones. Estos materiales teóricamente proveen inhibición mediante la encapsulación de las partículas de lutita y/o reduciendo la actividad de la fase acuosa, por lo tanto limitando la penetración de agua dentro de las láminas de arcillas. Estos mecanismos inhibidores son generalmente considerados menos efectivos que el mecanismo de intercambio catiónico atribuido a los aditivos catiónicos y anfotéricos.

Uno de los polímeros más ampliamente utilizado en la industria de fluidos de perforación es la familia *poliacrilamida*.<sup>28</sup> La poliacrilamida es no iónica (el grupo funcional amida es no iónico), pero puede convertirse en aniónica insertándole grupos carboxilos los cuales son aniónicos. Esta conversión se llama hidrólisis. El uso final está controlado por el porcentaje de hidrólisis y el peso molecular. Se sabe que un grado de hidrólisis entre el 20 y 40% y un peso molecular mayor de  $3 \times 10^6$  proporcionan óptima actividad estabilizadora de lutitas cuando se formula KCl. Esta es la base del lodo KCl - PHPA /Partially Hydrolyzed Polyacrylamide/ para perforar lutitas sensitivas al agua.

Es bien conocido al respecto de la acción del PHPA, que puede adsorberse en múltiples sitios sobre la superficie de la arcilla y por consiguiente puede combatir la desintegración del material de la lutita.

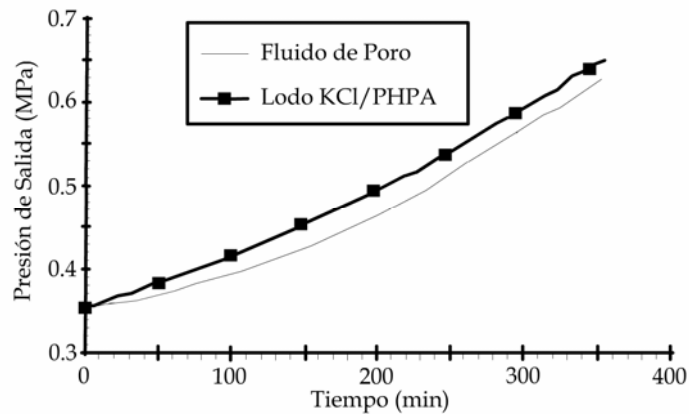
La Figura 47 muestra el esparcimiento del PHPA sobre una superficie de calcita, usando un TEM /Transmission Electron Microscopy/. La imagen revela una especie de *telaraña* formada por el PHPA, mostrada como una elevación sobre la superficie de la lutita.



**Figura 47. Imagen TEM del PHPA sobre una calcita (van Oort, 2003)**

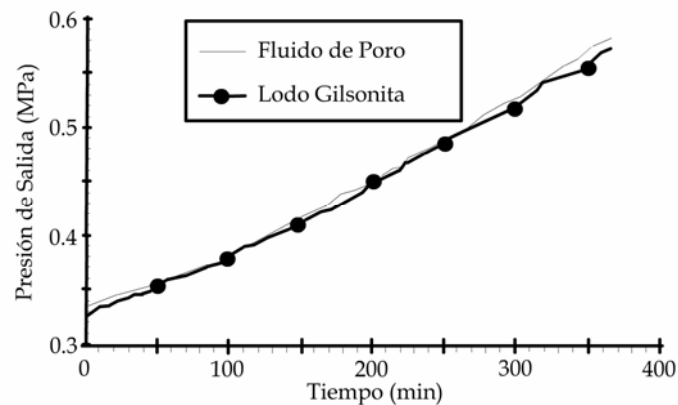
La Figura 47 también clarifica las deficiencias de los polímeros de alto peso molecular estabilizadores de arcilla como el PHPA; pues su cobertura de la superficie de la lutita y la eficiencia de bloqueo del poro es mínima. Como resultado, la presión de penetración del lodo no es de ninguna manera retardada por ellos como se muestra en la Figura 48. Para los polímeros de bajo peso molecular que realmente entran en las lutitas, sus tasas de difusión son mucho más bajas que las tasas de difusión de la presión de poro, es decir ellas están retrasadas detrás del frente de la presión de poro. Siguiendo esta argumentación, el uso recomendado para estos aditivos es la estabilización de los ripios.

La Figura 48 muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión para un lodo KCl/PHPA, realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F. Note que la tasa de transmisión de presión es la misma que para la curva estándar del fluido de poro, es decir, el PHPA no retarda la presión de penetración del lodo.



**Figura 48. Transmisión de presión para un lodo KCl/PHPA (van Oort, 1994)**

**2.3.3 Asfáltenos, Gilsonitas y Grafitos.**<sup>47</sup> Los asfáltenos, gilsonitas y grafitos son utilizados para una variedad de propósitos, entre ellos la estabilización de lutitas. Estos tipos de aditivos no tienen efecto sobre la presión de hinchamiento. También, su considerable tamaño evita la entrada en las lutitas y el bloqueo efectivo de las gargantas de poro. Por esto, la invasión de filtrado y la presión de penetración del lodo no serán retardadas. La Figura 49 muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión, en la cual la tasa de presión de penetración del lodo en la lutita es medida para un lodo gilsonita (5% w/w), realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F.



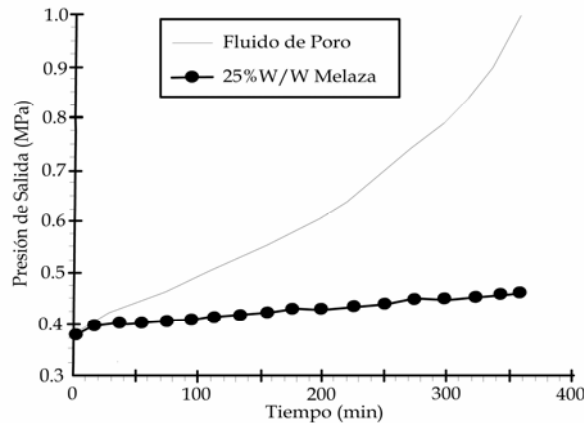
**Figura 49. Transmisión de presión para un lodo gilsonita (van Oort, 1994)**

Evidentemente, el lodo gilsonita no retarda la tasa de invasión de agua. Se concluye que el efecto de tales aditivos sobre la estabilidad de las lutitas es por esto muy limitado. Estos aditivos tienen mejor aplicación para ayudar a sellar las micro-grietas en las formaciones fracturadas.

**2.3.4 Azúcares y Derivados del Azúcar.**<sup>47</sup> Los sacáridos (azúcares) son bien conocidos como viscosificantes de bajo peso molecular los cuales tienen la ventaja de no ser perjudiciales ambientalmente. Ellos viscosifican el filtrado del lodo efectivamente cuando son utilizados a concentraciones apropiadas, de este modo reduciendo el flujo hidráulico del agua en las lutitas<sup>45</sup>, ver Figura 50. Además, ellos disminuyen las actividades del agua y por consiguiente generan presiones osmóticas que pueden ser utilizadas para deshidratar la lutita. Estos sistemas de azúcares son vulnerables al ataque de organismos biológicos, la cual puede hacer que la preservación del lodo y los aditivos base en el lugar del taladro sea difícil. La mayoría de estos problemas fueron evitados usando metilglucósidos, una especie de sacárido metilado que es menos sensitivo al ataque biológico. El metilglucósido esencialmente trabaja de la misma manera como otros sacáridos.

Los sacáridos son recomendados para la estabilización de ripios y de la cara del pozo. Una restricción de su uso es que concentraciones de productos relativamente altos (típicamente > 30% w/w) son necesarios para alcanzar los beneficios deseados, lo cual puede afectar la economía de estos sistemas y llevar a una viscosidad alta del lodo base. Cuando son formulados sistemas que puedan deshidratar efectivamente las lutitas, ellos también pueden ser aplicados en la reducción del bit balling e incrementar la ROP. *Los sistemas que están en la mayor capacidad de lograr esto son mezclas de glucósido con sistemas de sales.*

La Figura 50 muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión para una solución de melaza (un producto residual en la refinación de la sacarosa), realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F. Note que la tasa de transmisión de presión es retardada debido al aumento de la viscosidad del filtrado.

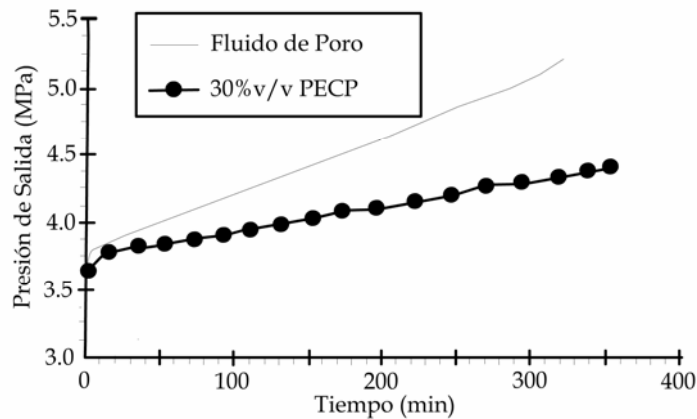


**Figura 50. Transmisión de presión - Melaza** (van Oort, 1994)

**2.3.5 (Poli-) glicerol y (Poli-) glicoles.**<sup>47</sup> Los (poli-) glicerol y (poli-) glicol (aunque no enteramente exacto, ellos simplemente se denotan a continuación como glicerol y glicol) han sido ampliamente aplicados en los fluidos para perforar lutitas. Los polímeros de bajo peso molecular (< 10,000 u.m.a.) viscosifican el filtrado y retardan por esto la invasión del filtrado en las lutitas.

La Figura 51 muestra el resultado de una prueba de transmisión de presión para una solución de PECP /Polyether Cyclic Polyol/ (30% v/v), realizada<sup>45</sup> en una lutita Pierre tipo I a 149°F. Note que la disminución en la presión de penetración del lodo esta directamente relacionada con la reducción en la tasa de flujo Darcy debido al mejoramiento de la viscosidad del filtrado con este

poliol. Resultados similares fueron obtenidos para soluciones concentradas (30% v/v) de metilglucósido, poli-gliceroles y poli-glicoles. Otros estudios han encontrado que incrementos en la viscosidad de filtrado puede ser significativo para la estabilidad de la lutita, suministrado un mayor tiempo de hueco abierto. Esto puede permitir bastante tiempo para correr el revestimiento y cementar antes que los problemas operacionales lleguen a ser significantes.



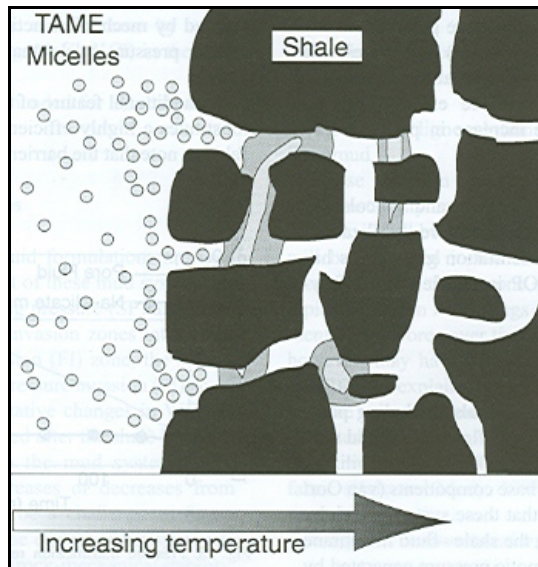
**Figura 51. Transmisión de presión para una solución PECP (van Oort, 1994)**

Gliceroles y glicoles de alto peso molecular (> 10,000 u.m.a.) se depositan fuera sobre la superficie de las lutitas. El cubrimiento superficial y el bloqueo de poro no serán muy efectivos, similares al PHPA (ver Figura 47). Por consiguiente, tales aditivos tienen pocos meritos como estabilizadores de las paredes del pozo.

Los glicoles TAME /Thermally Activated Mud Emulsion/ tienen un mecanismo adicional por medio del cual pueden estabilizar las lutitas (ver Figura 52). Estos glicoles exhiben una solubilidad inversa y un comportamiento de punto de niebla en el agua. Esto significa que ellos son

solubles en el agua por debajo de cierta temperatura conocida como Temperatura de Punto de Niebla (CPT), pero será una fase separada formando una emulsión por encima de esta temperatura. Este efecto es utilizado en la estabilización de las lutitas.

En una situación normal de perforación, el lodo estará a la Temperatura de Circulación de Fondo de Pozo (BHCT), perforando una lutita inicialmente a la Temperatura Estática de Fondo de Pozo (BHST). El lodo es diseñado tal que el CPT (la cual es una función del tipo de glicol y salinidad del lodo) y el BHCT coincidan. Por eso, en la broca los glicoles están justo sobre el límite de nublamiento. Los glicoles solubles en agua (presentes como pequeñas micelas) invadirán ahora la lutita y experimentaran un incremento en la temperatura debido a que el BHST es mayor. Esto provocara una separación de las fases y una emulsificación. Los bloques emulsionados de esta manera impedirán una mayor invasión de fluido y presión de penetración del lodo, estabilizando la lutita.



**Figura 52. Mecanismo de activación térmica - TAME (van Oort, 1994)**

Los gliceroles y glicoles de bajo peso molecular son recomendados para la estabilización de ripios y de las paredes del pozo. También, un reconocimiento directo de las píldoras de alta concentración de glicol ha sido mostrado para mejorar el ROP en campo.

**2.3.6 Sistemas Mezclados de Polioles y Sales.**<sup>47</sup> Las combinaciones de varios polioles (incluyendo poligliceroles, poliglicoles, y metilglucósido) y sales (por ejemplo NaCl, CaCl<sub>2</sub>) son mucho más efectivos en la estabilización de lutitas que sus componentes base individuales. Fue encontrado que estos sistemas trabajan por sinergia a través del incremento de la eficiencia de la membrana lutita - fluido. Debido a la presión osmótica generada por la salinidad (es decir, disminuyendo la actividad del agua del fluido de perforación tal que sea más baja que la actividad del fluido de poro)<sup>21</sup>, las lutitas pueden ser efectivamente deshidratadas.

**2.3.7 Silicatos.**<sup>40</sup> Los fluidos de perforación base silicato fueron implementados por primera vez en 1930, donde probaron ser muy exitosos en la estabilización de lutitas altamente reactivas, pero el difícil control de la reología de estos lodos discontinuó su uso. Investigaciones posteriores en 1980 mostraron que los silicatos utilizados en conjunto con el ión potasio y polímeros específicos, se combinan en un paquete efectivo de estabilización de lutita, lo cual conllevó a que fueran reintroducidos en la industria petrolera en los 90's.

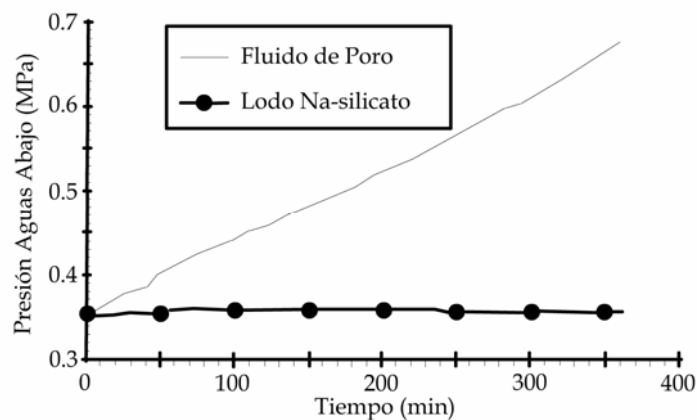
Estos lodos económicos y ambientalmente benignos combinan un juego de características únicas que los hacen ajustarse excelentemente a la estabilización de las lutitas: a través de los enlaces químicos de oligómeros de sílice sobre la superficie de los ripios y de la formación, a través de la reacción

con los iones polivalentes disponibles en el fluido de poro de la lutita (por ejemplo  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) para formar precipitados insolubles, y a través de la polimerización (gelificación) del silicato que da como resultado complejas estructuras poliméricas inorgánicas, formando una capa protectora sobre todas las superficies.

Todos los silicatos contienen tres componentes básicos:

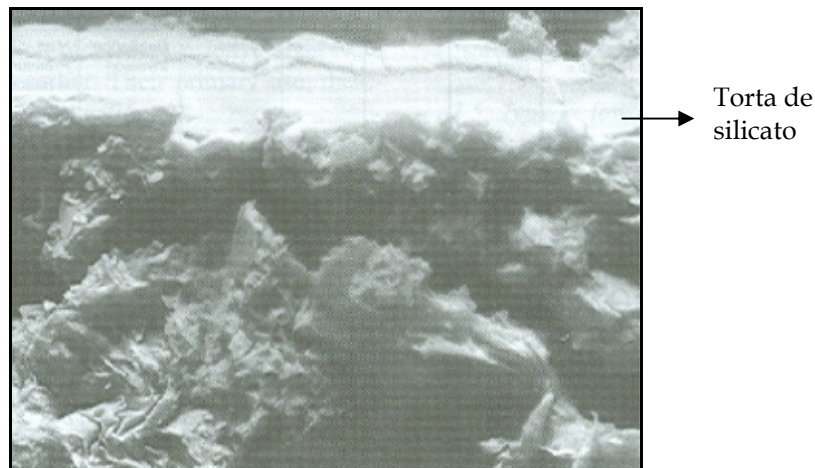
- Sílice,  $\text{SiO}_2$  (arena).
- Álcali,  $\text{Na}_2\text{O}$  ó  $\text{K}_2\text{O}$ .
- Agua.

A medida que el silicato soluble entra en contacto con la superficie de las lutitas (arcillas), el pH neutro a ácido de los fluidos de poro y la reacción con los cationes divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) dentro y fuera de la lutita provocará la gelificación del silicato. La barrera formada por silicatos gelificados y precipitados evitaran cualquier invasión de filtrado del lodo y de la presión de penetración, como se muestra en la Figura 53.



**Figura 53. Transmisión de presión para un lodo Na-silicato (van Oort, 1994)**

La Figura 54 muestra una imagen SEM de una lutita después del tratamiento con un lodo base silicato: una barrera de sílice de espesor 10  $\mu\text{m}$  es claramente visible sobre la superficie expuesta al lodo. De hecho, los mecanismos de gelificación y precipitación han sido mostrados para sellar pequeñas grietas y fracturas en lutitas. Así, los lodos base silicato pueden estabilizar formaciones que fueron fracturadas in-situ, donde las fracturas han sido inducidas ya sea por la acción mecánica de la sarta de perforación o por suaveos de presión anular que tienen localmente fallada la lutita localmente.



**Figura 54. SEM de una lutita expuesta a un lodo silicato** (van Oort, 2003)

Un rasgo adicional de la barrera de silicato es que constituye una membrana de alta eficiencia osmótica (la barrera restringe el flujo hidráulico de agua pero no la transferencia osmótica de la misma) que puede ser aprovechado para deshidratar la lutita y mejorar la estabilidad. A esta magnitud, la actividad de agua del fluido de perforación debe bajarse para generar una presión osmótica eficaz. Esto puede hacerse utilizando varias sales monovalentes (por ejemplo NaCl, KCl) en la formulación del lodo. Los lodos

silicatos son recomendados para todos los usos de estabilización de lutitas, con su nivel optimo de operación a pH's entre 11 y 12,5.

## 2.4 SISTEMAS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Las formulaciones especificas de los fluidos de perforación para lutitas se clasifican ahora basadas en el efecto de estos sistemas de lodo sobre el Contenido de Agua (WC), la Presión de Hinchamiento (SP) y la Presión de Poro (PP) para las tres zonas de invasión (ver Figura 39) analizadas previamente: la zona de Invasión del Filtrado (FI), la zona de Invasión de Solute (SI), y la zona de Invasión de Presión (PI). La Figura 55 representa los cambios cualitativos en WC, SP y PP que habrán ocurrido después que la lutita ha sido expuesta por algún tiempo a los sistemas de lodo. Los cambios son mostrados como incrementos o disminuciones con respecto a los valores nativos de la lutita.<sup>47</sup>

La habilidad para estabilizar lutitas de varios sistemas de fluidos de perforación se considera que aumenta con el tipo de lodo como sigue:

$$\text{Tipo I} < \text{Tipo II} < \text{Tipo III} \leq \text{Tipo IV} \leq \text{Tipo V}$$

Los fluidos Tipo V se consideran como los más adecuados para proteger los ripios, estabilizar la cara del pozo y minimizar el bit balling (es decir, maximizar la ROP).

**2.4.1 Tipo I: Lodos Base Agua Dispersos - No Inhibidos.** Entre ellos están los lodos de lignosulfonato, los lodos de yeso y los lodos tratados con cal. Estos lodos en general ofrecen muy poco para neutralizar la inestabilidad de

las lutitas. Con el tiempo, el WC, SP y PP serán todos incrementados en la zona FI; SP y PP serán incrementadas en la zona SI; y por último se incrementará PP en la zona PI. Como resultado, habrá con el tiempo una rápida dispersión de cortes y agrandamiento progresivo de las paredes del pozo. La dispersión de sólidos, sin embargo, puede tener un efecto benéfico sobre el bit balling y la ROP, como se explicó previamente. Note que el lodo tratado con cal puede ser un caso excepcional. Aunque lo anterior sea cierto, los lodos tratados con cal pueden tener un efecto benéfico promoviendo la cementación in-situ de la estructura de la lutita.

**2.4.2 Tipo II: Lodos Base Agua Inhibidos Convencionales.** Los lodos KCl/PHPA, los lodos de alto contenido de KCl y los lodos base amina funcionalmente catiónicos, caen dentro de este grupo. Estos lodos son definitivamente un paso en la dirección correcta cuando formaciones de lutitas reactivas (es decir, lutitas con un alto contenido de esmectita y consecuentemente alta presión de hinchamiento) son perforadas.

La PP será aumentada en todas las tres zonas de invasión, pero la SP podrá ser reducida debido a la difusión de los solutos inhibidos dentro de la lutita y a su intercambio en los sitios de arcilla. Cuando la difusión de presión del lodo y la difusión del soluto van aproximadamente en paralelo, los efectos de la PP y la SP se pueden compensar, resultando una situación más o menos estable.

Estos lodos también ofrecen soluciones satisfactorias para la estabilidad de los ripios. Los solutos inhibidos reducirán la SP y los polímeros de alto peso molecular que trabajan juntamente con ellos (por ejemplo, PHPA) pueden encapsular el material evitando la desintegración. Sin embargo, estos lodos

claramente se quedan cortos cuando lutitas menos reactivas y más antiguas son perforadas como se explicó anteriormente. Su principal uso, por consiguiente, es para la estabilización de los ripios.

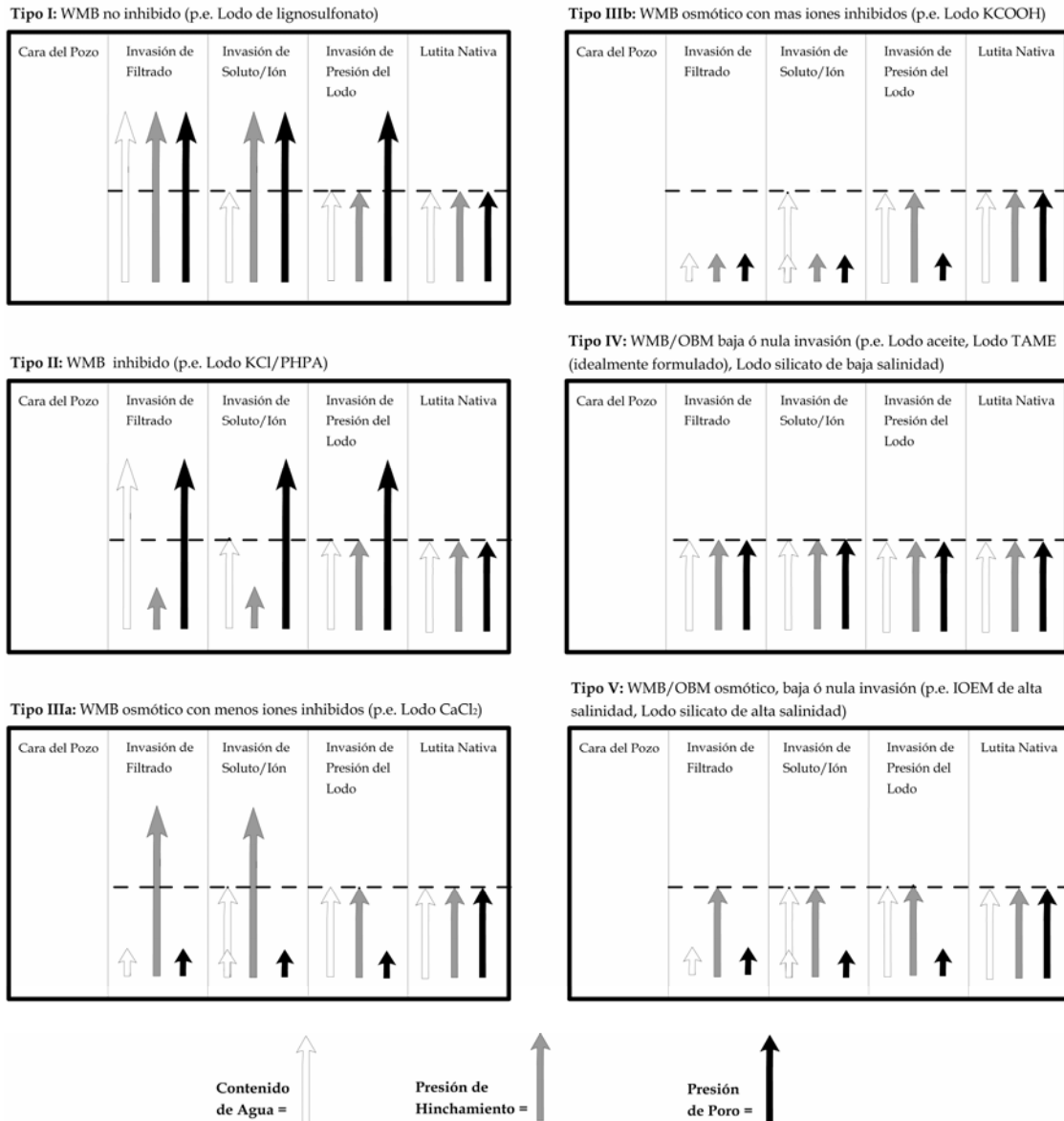


Figura 55. Efecto de los sistemas de lodo en las lutitas (van Oort, 2003)

**2.4.3 Tipo III: Lodos Base Agua Osmóticos.** Entre ellos se encuentran los lodos base CaCl<sub>2</sub> y MgCl<sub>2</sub>, el lodo KCOOH y el lodo de metilglucósido. La

acción de la membrana semipermeable de los sistemas fluido - lutita es aprovechado en los lodos base agua osmóticos. Estos fluidos de perforación emplean solutos de baja movilidad para generar eficiencia de membrana y disminuir la actividad del agua tal que un gradiente de presión osmótica, dirigido desde la lutita hacia el lodo, sea generado. La presión osmótica efectiva generada ha mostrado ser lo suficientemente fuerte para compensar completamente el sobrebalance hidráulico del lodo, llevando a la deshidratación de la lutita. Como se muestra en la Figura 55, el WC y PP se espera que sean reducidos, resultando en una situación más estable.

Este tipo es subdividido basado en el efecto del lodo sobre la SP. El Tipo IIIa elevará la SP en las zonas FI y SI, debido, por ejemplo al intercambio desfavorable de los cationes de la arcilla, el cual puede anular algo del efecto benéfico sobre WC y PP, posiblemente llevando a la inestabilidad. El Tipo IIIb disminuirá la SP en el FI y en el SI y proporcionará estabilidad adicional. Note que la Figura 55 muestra el escenario más favorable para lodos Tipo IIIb, en la cual el contra-flujo osmótico del agua de poro sobrepasa completamente el flujo hidráulico del filtrado del lodo.

**2.4.4 Tipo IV: Lodos Base Agua/Aceite de Baja o Nula Invasión.** Los lodos TAME, los lodos silicato de actividad balanceada, los lodos sintéticos y base aceite de actividad balanceada, y los lodos 100% sintéticos y 100% base aceite son de este grupo. Estos fluidos de perforación actúan por medio de un mecanismo específico que les impide invadir las lutitas y cambiar el WC, SP y PP; estas propiedades son esencialmente por esto menos alteradas. Ejemplos de este tipo son los sistemas 100% sintéticos y 100% base aceite, los cuales están restringidos de la invasión debido a presiones capilares. Los lodos de poliglicol TAME crean emulsiones in-situ de temperatura activada que

taponan las gargantas de poro; los silicatos actúan de manera similar mediante la creación de precipitados y geles in-situ. Cuando la actividad del agua de la lutita y del lodo son similares (es decir, están balanceadas), entonces no habrá transporte osmótico de agua.

#### **2.4.5 Tipo V: Lodos Base Agua/Aceite Osmóticos de Baja o Nula Invasión.**

Ejemplos de esta clase son los lodos silicatos de baja actividad, los lodos de emulsión inversa de baja actividad y los sistemas mezclados de polioles y sales de membrana inducida. Los fluidos de perforación Tipo V son formados por combinación de los Tipo III y los lodos Tipo IV.

Primero que todo, el mecanismo que previene la invasión de filtrado en lutitas es aprovechado, así como el mecanismo de presión capilar con lodos de emulsión inversa y el mecanismo de taponamiento en lodos base silicato. Segundo, la habilidad de estos sistemas para generar membranas osmóticas de alta eficiencia es usada para mejorar la estabilidad. Esto esta acompañado por la disminución de la actividad del agua en el fluido de perforación la cual genera una presión osmótica que puede estimular un flujo osmótico de agua desde los poros de la lutita hacia el lodo. Este flujo de agua puede reducir el WC y PP cerca de la cara del pozo (hasta la presente no es claro que pasa claramente con la SP: probablemente no sea significativamente afectada). Estos lodos son altamente efectivos en el tratamiento de todos los tipos de problema de lutita, como se demostró mediante los IOEMs de alta salinidad (lodos de aceite o sintéticos) siendo la industria estándar para perforar las lutitas problemáticas.

## 2.5 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIZADORES DE LUTITA

La mayoría de las pruebas para la evaluación de estabilizadores de lutita se desarrollan bajo condiciones simuladas in situ, principalmente con respecto a la temperatura. Pruebas más simples son llevadas a cabo bajo condiciones atmosféricas, para ver si una técnica rápida (aplicable en el sitio de perforación) puede ser realizada para caracterizar los efectos de la exposición de un fluido sobre el comportamiento de las lutitas.<sup>21</sup>

Diferentes métodos son utilizados para evaluar las propiedades de los inhibidores de lutita. Los métodos de prueba más comúnmente utilizados son: Prueba de Tolerancia a la Bentonita /Bentonite Tolerance Test/, Prueba de Dispersión /Hot Roll-Dispersion Test/, Prueba de Acreción /Accretion Test/, Prueba de Durabilidad /Slake Durability Test/ y Prueba de Dureza /Bulk Hardness Test/, las cuales miden las interacciones del sistema fluido - lutita y se basan principalmente en el rolado de la muestra, ya sea con el fin de envejecer el sistema o de simular las condiciones de abrasión mecánica que ocurre en este.

El envejecimiento por rolado /Aging/ (ver Figura 56) es un proceso que permite a una muestra de fluido de perforación, el cual contiene todos los ingredientes requeridos y ha sido sometido a un periodo de cizalla, se le desarrolle más completamente sus propiedades reológicas y de filtrado a través de un tiempo adicional para hidratación de sus componentes. El periodo de tiempo necesario para desarrollar más completamente las propiedades varia desde tan poco como varias horas (más comúnmente toda la noche, o 16 horas) hasta tanto como varios días. El envejecimiento puede

ser realizado a temperatura ambiente o a temperatura elevada, dependiendo del sistema de investigación.<sup>4</sup>



**Figura 56. Equipo para envejecimiento por rolado (Lab. TOP - ICP, 2005)**

Se debe tener en cuenta que la prueba de rolado depende del contenido de humedad de la lutita, de la composición de la lutita, de la viscosidad del fluido de prueba, de la velocidad de rotación de los rodillos y de la temperatura de prueba. Todas estas variables deben ser cuidadosamente controladas para que así la técnica de rolado mida adecuadamente las interacciones entre los electrolitos y los ripios de lutita, obteniéndose reproducibilidad de los datos.<sup>8</sup>

**2.5.1 Prueba de Tolerancia a la Bentonita.**<sup>41</sup> La habilidad de un químico a evitar el rendimiento de la bentonita y mantener un bajo perfil reológico es la más sencilla de las pruebas para la evaluación de los inhibidores de lutitas. La prueba BTT determina la máxima cantidad de bentonita API que puede ser tolerada por un tratamiento sencillo de inhibidor de arcilla durante un periodo de varios días. Este procedimiento de evaluación fue diseñado para simular la incorporación relativamente lenta de las arcillas en el fluido de perforación, como ocurre mientras se esta perforando lutitas altamente reactivas sensitivas al agua.

**Tabla 12**

**Detalles de la Prueba de Tolerancia a la Bentonita**

<b>BENTONITE TOLERANCE TEST</b>	
Tipo de horno	Baroid Roller Laboratory Oven
Temperatura	150°F (65,6°C)
Tiempo	16 horas
Descripción del fluido	Agua + Inhibidor + Bentonita

**Fuente:** Stamatakis, E.: A New Generation of Shale Inhibitors for WBM. 1995.

Teniendo en cuenta que un fluido que contiene una bentonita hidratada e hinchada, es bien sabido que forma una torta de baja permeabilidad y produce valores bajos de perdida de filtrado API. Cuando la bentonita es inhibida, una torta de baja permeabilidad no puede ser formada sin un aditivo controlador de filtrado, por lo que la inhibición resulta en altos valores de perdida de filtrado API. De acuerdo lo anterior, la prueba BTT puede ser complementada usando el procedimiento estándar de filtrado API.

**2.5.1.1 Equipos.** Los siguientes equipos con las siguientes especificaciones deben ser utilizados para este procedimiento:

- a. Balanza: precisión de  $\pm 0,01$  gramo.
- b. Horno de rolado: típicamente de 17 a 35 rpm, ver Figura 56. Para buenos resultados, todas las pruebas se deben realizar con el mismo horno para asegurar condiciones de prueba constantes.
- c. Celdas de rolado (no de aleaciones aluminio-bronce), ver Figura 56.
- d. Viscosímetro Fann Modelo 35A.
- e. Filtro prensa API Baja Presión/Baja Temperatura.
- f. Medidor de pH.
- g. Reloj o cronómetro.
- h. Recipientes para peso.
- i. Espátula.

#### **2.5.1.2 Procedimiento - Estudios reológicos.**

- A un barril equivalente de agua fresca agregar 8 lb/bbl de inhibidor.
- Ajustar pH a 9,5 (NaOH) y adicionar 10 lb/bbl de bentonita.
- Después de agitar a 150°F y por 16 horas, se miden las propiedades reológicas (viscosímetro Fann Modelo 35A) antes de ajustar nuevamente el pH y adicionar otra cantidad de bentonita posteriormente.
- Las adiciones diarias de bentonita (agitando durante 30 minutos) y posterior rolado se continúan hasta que la muestra llegue a ser demasiado viscosa para ser medida.

#### **2.5.1.3 Procedimiento - Estudios de filtrado API.**

- A un barril equivalente de agua fresca agregar 8 lb/bbl de inhibidor.
- Ajustar pH a 10,0 (NaOH) y adicionar 50 lb/bbl de bentonita.

- Después de agitar a 150°F y por 16 horas, se mide la cantidad de pérdida de filtrado a 30 minutos.

**2.5.2 Prueba de Dispersión.** La prueba de dispersión es una prueba rápida y relativamente sencilla, para evaluar la tendencia dispersiva de las lutitas cuando se exponen a los fluidos de perforación<sup>32</sup>. Este procedimiento<sup>4</sup> involucra trituración, tamizado y ubicación de las partículas de lutitas dentro de un fluido de perforación antes de envejecer el fluido, ya sea estática o dinámicamente. La recuperación (por medio de los tamices 12 y 80, ya que todo el material que pase a través del tamiz 80 se considera irrecuperable en aplicaciones normales de campo, debido a que el mecanismo de los sistemas de control de sólidos no separa partículas menores a este tamaño), lavado, secado y repesado de las partículas dará una indicación de la tendencia del fluido a prevenir la dispersión de las lutitas. Esta prueba es solo una medición relativa y debería ser incluida como parte de un amplio programa de pruebas.

**Tabla 13**

**Detalles de la Prueba de Dispersión**

<b>HOT ROLL /DISPERSION TEST</b>	
Tipo de horno	Baroid Roller Laboratory Oven
Temperatura	150°F (65,6°C)
Tiempo	16 horas
Descripción del material	Ripios de campo
Tamaño de la lutita	6 (3,35 mm) / 12 (1,7 mm)
Peso del material	20 gramos
Tamiz utilizado	6, 12 y 80 mesh

**Fuente:** Schlemmer, R.: Progression of Water Base Fluids Based on Amine [...]. 2003.

El estándar establecido no especifica ni limita la condición y selección de la lutita (por ejemplo, el contenido de agua), aunque ellas son extremadamente

importantes. La reología variable del fluido de perforación ha demostrado dificultad para el control de prueba a prueba, por lo que los parámetros reológicos de cada fluido probado son diseñados<sup>32</sup> de manera similar para minimizar cualquier inexactitud en el cruce de comparaciones de fluido.

**2.5.2.1 Equipos.**<sup>4</sup> Los siguientes equipos con las siguientes especificaciones deben ser utilizados para este procedimiento:

- a. Balanza: precisión de  $\pm 0,01$  gramo.
- b. Horno de rolado: típicamente de 17 a 35 rpm, ver Figura 56. Para buenos resultados, todas las pruebas se deben realizar con el mismo horno para asegurar condiciones de prueba constantes.
- c. Celdas de rolado (no de aleaciones aluminio-bronce), ver Figura 56.
- d. Reloj o cronómetro.
- e. Recipientes para peso.
- f. Espátula.
- g. Baño de lavado o sumidero. Por lo menos de  $\frac{1}{2}$  galón (2 litros) de capacidad.
- h. Agua de lavado inhibida, que puede ser:
  - Una versión sintética del lodo base agua salada.
  - Un fluido conocido que sea substancialmente inhibido al uso de lutitas, por ejemplo, 15 lpb de cloruro de potasio (KCl).

Nota: Agua de lavado de salinidad mucho mayor que el lodo base salmuera puede causar el bloqueo del tamiz debido a la coagulación del lodo.

- i. Agua de lavado inhibida suministrada a 0,53 galones por minuto,  $\pm 0,05$  gpm (2 litros /min,  $\pm 0,2$  litros/min), con aproximadamente una salida de

0,30 in (0,75 cm.) de ID.

j. Tamiz (Figura 57):

- Un tamiz con 0,007 in. (0,178 mm) de abertura, U.S. Sieve Number 80.
- Un tamiz con 0,067 in. (1,7 mm) de abertura, U.S. Sieve Number 12.
- Un tamiz con 0,132 in. (3,35 mm) de abertura, U.S. Sieve Number 6.
- Base del tamiz.



**Figura 57. Tamices (Lab. TOP - ICP, 2005)**

k. Horno de secado regulado para 220°F, ± 5°F (105°C, ± 3°C), Figura 58.



**Figura 58. Horno de secado (Lab. TOP - ICP, 2005)**

**2.5.2.2 Procedimiento.**<sup>4</sup> El procedimiento para realizar la prueba de desintegración de partículas de lutitas es como sigue:

- Obtener recortes de lutitas (preferiblemente con su contenido de humedad in situ). Antes de usarlas, tamizar los recortes de lutitas para clasificarlas en tamaños menores que 0,132 in. (3,35 mm) y mayores que 0,067 in. (1,7 mm), Figura 59.



**Figura 59. Recortes de lutita** (Lab. TOP - ICP, 2005)

- Pretamizar el fluido de perforación a través de un tamiz 80 para remover cualquier partícula de mayor tamaño que puede ser reportada incorrectamente como lutita recuperada. Ver Figura 60.
- Adicionar 350 cm<sup>3</sup> de fluido de perforación medidos ya sea por volumen o por peso a cada celda de rolado.
- Adicionar 20 gramos de recortes de lutitas (tamizadas antes de su uso) al fluido a cada celda de rolado, tape, y rápida y suavemente agite para humedecer y separar las partículas.
- Colocar las celdas de envejecimiento en el horno de rolado preajustado a la temperatura deseada y rolar por un periodo de tiempo de 16 horas.

Nota: El tiempo de rolado debe ser el mismo para todos los fluidos que están siendo evaluados en una lutita dada.

- Después de que el periodo de rolado es completado y las celdas se han enfriado a una temperatura segura de manipulación, transferirlas a una posición estática con el fin de alcanzar una temperatura constante para realizar todas las operaciones de recuperación secuencial (por ejemplo, baño de agua fría a la temperatura ambiente).
- Los contenidos de cada celda de rolado son volteados y vertidos sobre los tamices 12/80 (pesados previamente) mientras un lavado de agua es aplicado a las mallas para prevenir el bloqueo viscoso. Los contenidos residuales de la celda de rolado son también desplazados hacia los tamices con agua de lavado. Figura 60.



**Figura 60. Tamices 12/80 y recortes recuperados (Lab. TOP – ICP, 2005)**

- El fluido de perforación es removido de los recortes de lutita remanente mediante un flujo de agua de lavado de 0,53 galones por minuto,  $\pm 0,05$  gpm (2 litros/min,  $\pm 0,2$  litros/min), a través de una manguera con una salida circular de aproximadamente 0,39 in. (0,75 cm.) ID. El agua es sistemáticamente regada por toda el área de la malla muchas veces por un periodo de aproximadamente 1 minuto o hasta que la lutita y la malla sean visualmente libres de residuos de lodo.
- Transferir el tamiz a un baño de  $\frac{1}{2}$  galón (2 litros) que contenga agua fresca y rápida pero suavemente sumerja el tamiz (a un ángulo para evitar que el aire quede atrapado) y remuévalo para que este y la lutita se hayan enjuagado del agua de lavado.
- Colocar el tamiz sobre una base de tamiz pre-pesada y secar en el horno hasta un peso constante; este es el peso final seco.
- Para determinar el % Recuperado, utilice la siguiente expresión:

$$\% \text{ Recuperado} \equiv \frac{\text{peso final seco} \times 100}{\text{peso inicial seco}} \equiv 100 \frac{a}{b} \quad (5)$$

Donde,

$a = y - z$ , el peso de lutita final seco.

$b = 20 (100 - c)/100$ , el peso de lutita inicial seco.

$c =$  El contenido de humedad inicial de la lutita, %.

$y =$  Peso del Tamiz + Base + Lutita recuperada seca.

$z =$  Peso del Tamiz + Base.

Nota:  $c \neq 0$ , si el contenido de humedad inicial de la lutita es tenido en cuenta.

El propósito de este proyecto es evaluar la eficiencia relativa de los

inhibidores utilizados y no la aplicación de estos en un caso en particular, por consiguiente  $c = 0$ .

La prueba de dispersión es una manera fácil y rápida de evaluar la compatibilidad entre los fluidos de perforación y las lutitas. Generalmente se realizan 3 pruebas: con agua únicamente y con lodo a dos concentraciones diferentes. Las partículas de lutita roladas en las pruebas de fluido no solamente indican la calidad del inhibidor químico del lodo sino también la inestabilidad debido a la abrasión mecánica.

**2.5.3 Prueba de Acreción.** Uno de principales defectos de los WBM inhibidos ha sido la tendencia a la acreción o /bit balling/ (Figura 61), donde lutitas parcialmente hidratadas son comprimidas sobre el ensamblaje de perforación, resultando un bajo desempeño de este (baja ROP). La acreción es un complejo proceso, siendo muy dependiente del tipo de lutita, parámetros de perforación, y tipo de fluido. La evaluación de acreción consiste en colocar una barra de acero (centralizada o no) en una celda de rolado que contiene el fluido de prueba<sup>32</sup>.



**Figura 61. Embolamiento de la broca /bit balling/ (Bland et al., 2001)**

**2.5.3.1 Equipos.**<sup>32,38</sup> Los siguientes equipos con las siguientes especificaciones deben ser utilizados para este procedimiento:

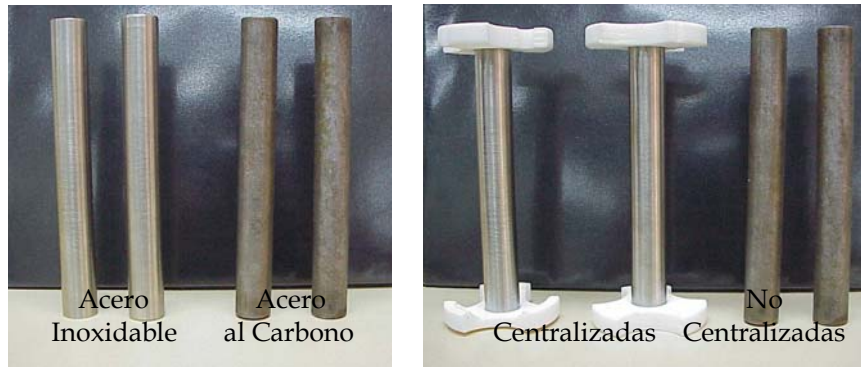
**Tabla 14**  
**Detalles de la Prueba de Acreción**

ACCRETION TEST	
Tipo de horno	Baroid Roller Laboratory Oven
Temperatura	80°F (26,6°C)
Tiempo	2 horas
Descripción del material	Ripios de campo
Tamaño de la lutita	6 (3,35 mm.) / 12 (1,7 mm.)
Peso del material	40 gramos
Dimensiones de la barra	19 mm. D x 155,8 mm. L
Peso de la barra	342,3 gramos
Material de la barra	Acero al carbono
Tiempo de escurrido	30 minutos

**Fuente:** Schlemmer, R.: Progression of Water Base Fluids Based on Amine [...]. 2003.

- a. Balanza: precisión de  $\pm 0,01$  gramo.
- b. Horno de rolado: típicamente de 17 a 35 rpm, ver Figura 56. Para buenos resultados, todas las pruebas se deben realizar con el mismo horno para asegurar condiciones de prueba constantes.
- c. Celdas de rolado (no de aleaciones aluminio-bronce), ver Figura 56.
- d. Reloj o cronómetro.
- e. Recipientes para peso.
- f. Espátula.
- g. Agua de lavado inhibida, que puede ser un fluido conocido que sea substancialmente inhibido al uso de lutitas, por ejemplo, 15 lpb de cloruro de potasio (KCl).
- h. Barras de acreción, ver Figura 62.
- i. Tamiz (ver Figura 57):
  - Un tamiz con 0,132 in. (3,35 mm.) de abertura, U.S. Sieve Number 6.

- Un tamiz con 0,067 in. (1,7 mm.) de abertura, U.S. Sieve Number 12.
  - Base del tamiz.
- j. Horno de secado regulado para 185°F, ± 5°F (90°C, ± 3°C), ver Figura 58.



**Figura 62. Barras de acreción** (Lab. TOP - ICP, 2005)

**2.5.3.2 Procedimiento.**<sup>32,38</sup> El procedimiento para realizar la prueba de acreción de lutitas es como sigue:

- Recortes de lutitas (secas) dimensionadas (entre 6/12) son colocadas uniformemente alrededor de la barra de acreción (centralizada o no).  
Figura 63.



**Figura 63. Montaje de la prueba de acreción** (Lab. TOP - ICP, 2005)

- La celda es cerrada y rolada a temperatura ambiente por un tiempo determinado (1 hora).
- Después del rolado, se extrae la barra, se deja escurrir por 10 minutos, se toma una fotografía.
- Después de ser removido el lodo, con agua de lavado y posterior baño con agua fresca para retirar el agua de lavado, se deja escurrir por otros 20 minutos y se determina el % de cortes adheridos a la barra.

Para determinar el tiempo de rolado necesario para la prueba de acreción, el cual depende del tipo de lutita, se recomienda monitorear la prueba cada 10 minutos y clasificar el estado de la lutita de la siguiente manera: suave, media, dura, cemento o ninguna; dependiendo de la facilidad con que puede ser removida de la barra con los dedos.

**2.5.4 Pruebas Complementarias.** Para la evaluación completa de los estabilizadores de lutitas, además de los métodos anteriores, generalmente también se realizan pruebas de dureza, durabilidad, compatibilidad y aceptabilidad ambiental. Dentro del alcance del proyecto, se propuso realizar las pruebas BTT, dispersión y acreción, en el Laboratorio de Tecnologías Operacionales (TOP) del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), donde se cuenta con los equipos necesarios para llevarlas a cabo. En lo que respecta a las pruebas de dureza y durabilidad, se sabe que no se realizan en el país por disponibilidad de equipos, en los diferentes laboratorios de investigación (en fluidos de perforación) de empresas como ECOPETROL, BJ Services, M-I Swaco y Halliburton.

Además de las pruebas BTT, dispersión y acreción, suficientes para evaluar un sistema estabilizador de lutitas (el cual comprende: un supresor de

hidratación, un supresor de dispersión y un supresor de acreción), esta investigación muestra los resultados de pruebas complementarias como la de compatibilidad, exposición simplificada y un seguimiento del método convencional de conservación del mucílago de fique, que son más fáciles de realizar y tienen costos más bajos.

**2.5.4.1 Prueba de Durabilidad.** Esta prueba es similar en diseño a la prueba de dispersión, pero el equipo donde se desarrolla proporciona un ambiente más áspero y más abrasivo (Figura 64)<sup>32</sup>.



**Figura 64. Equipo de durabilidad (Patel et al., 2002)**

Esta prueba fue diseñada para simular la exposición de los ripios al fluido de perforación en el anular del pozo, y subsecuentemente su remoción en las zarandas. La evaluación consiste en colocar una cantidad pesada y tamizada de ripios de lutitas en una jaula redonda semi inmersas en el fluido de prueba. La jaula con ripios es rotada por un periodo de 4 horas a temperatura ambiente. Durante la rotación, cualquier lutita sensitiva tiende a hidratarse, desintegrarse, y dispersarse, pasando a través del tamiz de la jaula.

**Tabla 15**

**Detalles de la Prueba de Durabilidad**

<b>SLAKE DURABILITY (CAGE TEST)</b>	
Velocidad de rotación	45 rpm
Temperatura	80°F (26,6°C)
Tiempo	4 horas
Descripción del material	Ripios de campo
Tamaño de la lutita	6 (3,35 mm) / 12 (1,7 mm)
Peso del material	30 gramos
Tamiz de la jaula	14 mesh

**Fuente:** Schlemmer, R.: Progression of Water Base Fluids Based on Amine [...]. 2003.

Los ripios de lutita remanentes en la jaula después del periodo de prueba son recuperados, lavadas, secadas durante la noche a 210°F y pesadas. El % recuperado de lutita para cada muestra se determina mediante el siguiente cálculo:

$$\% \text{ Recuperado} \equiv \frac{\text{peso final seco} \times 100}{\text{peso inicial seco}} \quad (6)$$

**2.5.4.2 Prueba de Dureza.**<sup>32</sup> Esta prueba es diseñada para dar una valoración de la dureza de la lutita seguido de la exposición al fluido de prueba. La dureza de la lutita puede ser relacionada con las propiedades inhibidoras del fluido que esta siendo evaluando. Las lutitas que exhiben una tendencia a adsorber líquido desde el fluido de prueba llegan a ser más blandas, y esto puede interpretarse como debilitamiento de las paredes del pozo durante la perforación y/o tendencia de las lutitas perforadas a la acreción. En esta prueba, los ripios de lutita tamizadas son roladas en el fluido de prueba por 16 horas a 150°F. Después del rolado, los ripios de lutita son recuperados en un tamiz 20 (1 mm.), lavadas con salmuera y luego colocadas en el equipo de dureza, Figura 65.



**Figura 65. Equipo de valoración de dureza (Patel et al., 2002)**

Usando una llave de torque, la lutita es expulsada a través de un plato perforado, midiendo el máximo torque requerido para cada giro en compresión. La Figura 66 muestra el resultado de una lutita después de ser expuesta a la prueba de dureza.



**Figura 66. Lutita expuesta a la prueba de dureza (Patel et al., 2001)**

Dependiendo a las condiciones de los ripios, el torque puede alcanzar una región constante o puede continuar elevándose durante la extrusión. Ripios de lutita más duros darán lecturas de torque más altos.

**Tabla 16**

**Detalles de la Prueba de Dureza**

<b>BULK HARDNESS TEST</b>	
Tratamiento previo	Rolado
Tipo de horno	Baroid Roller Laboratory Oven
Temperatura	150°F (65,6°C)
Tiempo	16 horas
Descripción del material	Ripios de campo
Tamaño de la lutita	6 (3,35 mm.) / 12 (1,7 mm.)
Peso del material	35 gramos
Tamiz de recuperación	20 (1 mm.)
Plato de forzado	37,0 x 0,109 in. (2,77 mm)
Material forzado	30 gramos

**Fuente:** Schlemmer, R.: Progression of Water Base Fluids Based on Amine [...]. 2003.

**2.5.4.3 Prueba de Compatibilidad.**<sup>43</sup> La presencia de un inhibidor de lutita dentro del fluido de perforación no debería tener un efecto adverso sobre cualquier propiedad física o química del fluido de perforación. Esta prueba se desarrolla con el fin de identificar el efecto de un aditivo sobre las propiedades originales del fluido. Las propiedades reológicas de los fluidos se deben medir antes y después del rolado a 120°F (48,8 °C).

**2.5.4.4 Prueba de Exposición Simplificada.**<sup>21</sup> Todas las pruebas anteriores se llevan a cabo bajo condiciones de fondo de pozo simuladas con respecto a interacción y temperatura. Pruebas más simples son también desempeñadas bajo condiciones atmosféricas, para ver si una técnica rápida (aplicable en el sitio del taladro) puede ser realizada para caracterizar los efectos de exposición del fluido sobre el comportamiento de la lutita. Por lo tanto, se entiende por prueba de exposición simplificada, el método de interacción lutita - fluido bajo condiciones atmosféricas. Las interacciones lutita - fluido depende fuertemente de los métodos de prueba y procedimientos que son aplicados, y resultados engañosos pueden obtenerse, especialmente cuando

se realizan bajo estas condiciones. Por esto, hasta que métodos más confiables puedan ser establecidos, es recomendado verificar las observaciones bajo condiciones simplificadas desarrollando también pruebas bajo condiciones de pozo simuladas.

**2.5.4.5 Prueba de Aceptabilidad Ambiental.**<sup>43</sup> La aceptabilidad ambiental de los fluidos acuosos de perforación y de re-acondicionamiento esta típicamente relacionada a la toxicidad, bio-degradabilidad, y potencial de bio-acumulación de los productos individuales. Para cuantificar la toxicidad de los inhibidores de lutita, estos se someten a una batería de prueba ambiental como la mostrada en la Tabla 17.

**Tabla 17**  
**Batería de Prueba Ambiental**

Ítems	Especie	Protocolo	Limite
<b>Toxicidad Sedimento</b>	Corophium volutator	PARCOM 95	LC <sub>50</sub> > 10 mg/l
<b>Toxicidad Acuática</b>	Skeletonema	ISO/DIS 10253	EC <sub>50</sub> > 10 mg/l
<b>Toxicidad Acuática</b>	Arcatia tonsa	ISO/TC47/SC5	LC <sub>50</sub> > 10 mg/l
<b>Toxicidad Acuática</b>	Juvenile turbot	OSPARCOM 95	LC <sub>50</sub> > 10 mg/l
<b>Bio-Degradabilidad</b>	-	OECD 306	> 20%
<b>Bio-Acumulación</b>	-	OECD 117	Nivel bajo

Fuente: Temple, C.: Drilling Fluids with Improved Shale Inhibition [...]. 2004.

El término LC<sub>50</sub> muestra la concentración del componente inhibidor de lutita que se estima letal para el 50% de la especie en estudio.

### 3. EL USO DEL MUCÍLAGO DE FIQUE COMO ESTABILIZADOR DE ARCILLAS

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA DE FIQUE

La botánica taxonómica del fique, no obstante haber sido estudiada por algunos naturalistas extranjeros y por varios investigadores colombianos, no está aún lo suficientemente esclarecida en cuanto a especies y variedades se refiere<sup>34</sup>.

El género *Furcraea* Vent. comprende cerca de 20 especies diferentes, algunas de las cuales se utilizan para la extracción de la fibra. Frecuentemente las especies de este género han sido confundidas con las pertenecientes al género *Agave*, de las cuales son completamente distintas desde el punto de vista botánico. El nombre del género es también, a veces, erradamente designado *Fourcroya* o *Furcroea*. El género *Furcraea* fue llamado así por Etienne Pierre Ventenat en 1793, en honor del conde Antoine de Fourcroy, químico del jardín du Roi de París.

Las plantas del género *Furcraea* son grandes (su altura varía entre dos y siete metros), de tallo erguido y forman rosetas de hojas largas, angostas, carnosas, puntiagudas, acanaladas, dentado - espinosas (unas variedades), y de color verde, semejantes a las de muchas especies del género *Agave* pero, en vez de la fuerte y grande espina terminal de las hojas de esta última, terminan en pequeñas puntas coriáceas, o, a veces; pueden tener una pequeña y débil espina. El ancho de las hojas maduras varía entre 10 y 20 cms. y el largo entre

uno y dos metros. Figura 67.



**Figura 67. Planta de fique - *Furcraea macrophylla*. Baker**

Pueden encontrarse plantas de más de 50 años de edad, pero su período típico de vida varía entre 10 y 20 años. Su vida útil comienza entre los tres y seis años, dependiendo de las condiciones que enfrente la planta. El período productivo alcanza otros ocho años, y la muerte le sobreviene cuando ha cumplido su ciclo vegetal que es cuando florece.

**3.1.1 Clasificación Taxonómica.**<sup>19</sup> El fique se clasifica como muestra la siguiente tabla.

**Tabla 18**

**Botánica Taxonómica del Fique**

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	
<b>Reino</b>	Vegetal
<b>Phylum</b>	Tracheophyta
<b>División</b>	Espermatophyta
<b>Clase</b>	Angiospermae
<b>Subclase</b>	Monocotyledonae
<b>Orden</b>	Liliflorae
<b>Familia</b>	Agavaceae
<b>Genero</b>	Furcraea
<b>Especie</b>	Macrophylla. Baker

**Fuente:** FEDEFIQUE: Guía Ambiental para el Subsector Fiquero. 2002

**3.1.2 Variedades Cultivadas en Colombia.**<sup>36</sup> Como se menciona anteriormente, el género *Furcraea* la comprenden cerca de 20 especies. Las variedades más difundidas en Colombia son: *Furcraea macrophylla*, *Furcraea cabuya*, *Furcraea castilla* y *Furcraea andina*. Estas tienen espinas a lo largo de los bordes de las hojas y terminan en una punta muy aguda. Sus características más especiales están resumidas en la Tabla 19.

**Tabla 19**  
**Características Generales de las Furcraeas en Colombia**

VARIEDAD	MACROPHYLLA	CABUYA	CASTILLA	ANDINA
<b>Descripción de la Planta</b>	Hojas verdes, puntiagudas, angostas y de espinas duras. Tronco corto.	Hojas verdes, grisáceas, lisas, brillantes, cóncavas, bordes sin espinas y punta aguda.	Hojas verdes, borde habano, espinas mitad de la hoja.	Hojas delgadas, verde oscuro, espinas encorvadas en su último tercio.
<b>Principales Zonas de Cultivo</b>	Antioquia, <b>Santanderes</b> , Cauca, Cundinamarca y Boyacá.	Antioquia y <b>Santanderes</b> .	Antioquia y Cundinamarca.	Nariño.
<b>Nombres Comunes</b>	Pirulero, jardineña, uña de águila, fique macho, cabuya y maguey.	Fique, cabuya, cabuya hembra, ceniza, fique liso.	Borde de oro, filo de barbera, castilla.	Rabo de chucha, penca, cabuya, maguey.
<b>Longitud de la Hoja</b>	150 a 200 cms.	150 a 300 cms.	200 a 300 cms.	120 a 170 cms.
<b>Ancho de la Hoja</b>	8 a 14 cms.	15 a 20 cms.	12 a 20 cms.	10 a 15 cms.
<b>Contenido de Fibra por Hoja</b>	3 a 4,5%	2,5 a 4%	3 a 4%	2 a 3%

Fuente: Perilla, A.: Tintura del Fique con Colorantes Naturales. 2002

### 3.2 ANTECEDENTES DEL ANÁLISIS Y UTILIZACIÓN DEL MUCÍLAGO DE FIQUE

Los mucílagos son sustancias intracelulares de los vegetales obtenidos de semillas, raíces, cortezas, hojas y otros órganos de las plantas mediante extracción, diferenciándose por sus propiedades físicas de las gomas y las pectinas con las cuales se suelen confundir. Mientras que las gomas se hinchan para dar soluciones coloidales gruesas y las pectinas se gelifican, los mucílagos al contacto con el agua producen polimerización formando redes.<sup>26</sup>

Desde 1926 se reportan haber realizado investigaciones para determinar composición en azúcares fermentables, y no reductores en el desecho tanto recién recolectado del desfibrado, como después de secado al aire y de dos meses de almacenamiento. Estos estudios reportan un contenido de fibra del 1,1%, y una composición en azúcares variable, entre el 5,4% y el 15,5% para los fermentables, y 3,5% a 17,3% para los no reductores, siendo en todos los casos superior para el producto seco al aire.

En 1952, se reportó la extracción e identificación de sapogeninas esteroidales de diferentes especies de *Agave*.

En el libro, "Observaciones sobre el beneficio e industrialización de fibras duras" de Coelho, se menciona que el desecho está conformado por: fibra corta de muy buena calidad; una pulpa, apta por su contenido de proteínas para alimento animal; ceras del orden del 4%, muy parecida en sus propiedades a la carnauba; y una sustancia gelatinosa, que por su acidez se recomienda para lavar incrustaciones de calderas.

En México, se reporta que a partir del henequén, se puede obtener un desecho que contiene saponinas. A partir de 1,8 Kg. de desecho se puede producir 9 g. de hecogenina y 40 ml. de alcohol del 95% de pureza.

En 1963, se confronta esta información al determinar el contenido de sapogeninas y otros compuestos orgánicos en tres especies colombianas de fique.

En 1966, se realizó un balance de los productos y subproductos del desfibrado reportando un rendimiento de fibra larga del 3%. Se realizó sobre el desecho una filtración al vacío, para separar los componentes sólidos de los líquidos. A partir del desecho se analizó la posibilidad de producción de concentrados, extracción de saponinas y sapogeninas. De las mezclas estudiadas se recomendó para concentrados, la combinación de melaza, harina de hueso y desecho de fique, anotando que además de los valores nutritivos, el desecho posee otros minerales que favorecen la ausencia de posibles enfermedades del ganado. En cuanto a las saponinas se estableció su naturaleza esteroidea y se recomendó su obtención mediante hidrólisis directa y adición de bisulfito de sodio, el rendimiento de este proceso es del 5%.

En 1967, se estudió el aprovechamiento de las ceras, para lo cual se evaluó la extracción con diferentes solventes, cloroformo, triclorometileno, etanol, hexano, entre otros. Concluyendo que la cera solo está presente en la epidermis de la hoja, que el mejor solvente es el cloroformo, siendo la cera obtenida sólida, suave y untuosa al tacto con un rendimiento final del 3,5%. No se recomendó el proceso por su elevado costo. Reportando igualmente un contenido de sólidos en el desecho del 8,7 % y el 91,4% restante como agua.

En 1974, Jorge A. Pérez reporta en su libro<sup>34</sup> sobre el fique, que desde mucho tiempo atrás el zumo de las hojas semi maduras se utiliza para producir alcoholes de muy baja calidad, bastante nocivos para la salud. De la misma manera se utiliza para desalojar el piojo común de las bestias, y para el blanqueo de ropa.

En 1980, diferentes investigaciones mostraron la presencia de saponinas y sapogeninas en diferentes especies de *Agave* y *Furcraea*, encontrando que para el caso particular del fique, la hecogenina aparece con mayor frecuencia en la zona basal de la hoja, mientras la tigogenina es frecuente en la zona apical.

En 1982, se estudió la posibilidad de obtención de proteasas de subproductos de la extracción de fibras de tipo *Agave*. Se reportó haber obtenido actividad proteolítica positiva. Al respecto, estudios similares en Brasil en 1964 habían demostrado la factibilidad de producción de enzimas proteolíticas, fácilmente utilizables como agentes biológicos en procesos industriales. Algunos ensayos reportados para el desecho son: densidad de 1,04 g/ml., sólidos del 7,2%, pH de 4,9 a 5,2.

En 1991, se desarrolló una investigación sobre el mucílago de fique conducente a la obtención de intermediarios claves en la síntesis de fármacos esteroideos en Colombia, particularmente precursores de las síntesis de hormonas sexuales y cortisonas. En la Tabla 20 se muestran las características generales del mucílago de fique reportadas por dicho estudio. El pH típico estuvo entre 4,45 y 4,78. Los estudios de estabilidad del mucílago fueron realizados a diferentes condiciones de temperatura y pH, recomendando un tratamiento preliminar con soda para modificar su pH a 10, valor óptimo encontrado. Se reportó la obtención de hecogenina y tigogenina en

proporción de 0,43 g/ml. y 0,25 g/ml. respectivamente. La presencia de azúcares como glucosa, sacarosa y galactosa y la ausencia de alcaloides, también fue reportada.

En el 2002, dada la presencia de celulosa en el mucílago de fique (material que se caracteriza por ofrecer ciertas propiedades a los fluidos de perforación), se iniciaron estudios<sup>31</sup> con el fin de utilizarlo como viscosificante y controlador de filtrado en estos sistemas. Además de su bajo contenido en la composición del mucílago, los resultados de las pruebas descartaron esta posibilidad. Cabe destacar que los resultados también mostraron una aparente disminución en el rendimiento de la bentonita al entrar en contacto con el mucílago de fique, por lo que surgió la necesidad de profundizar esta investigación con el fin de evaluar su potencial como aditivo estabilizador de arcillas.

**Tabla 20**

**Características Generales del Mucílago de Fique**

Propiedad	Rango
Densidad	1,021 - 1,029 g/ml
pH	4,45 - 4,78
Humedad	90,48 - 94,58%
Sólidos totales	5,42 - 9,52%
Sólidos solubles	5,6 - 9%
pH óptimo de conservación	10
Azúcares presentes	Sacarosa, glucosa y fructuosa

Fuente: Delvasto, S.: Aprovechamiento Integral del Fique [...]. 1995.

El mucílago de fique en términos generales, se considera constituido por: agua, celulosa, materia orgánica y minerales (Tabla 21). La materia orgánica comprende: azúcares, proteínas, esteroides, saponinas y sapogeninas. Y en la

parte inorgánica se destacan las sales de calcio, potasio, magnesio y sodio, entre otras.<sup>13</sup>

**Tabla 21**  
**Composición del Mucílago de Fique**

COMPOSICIÓN DE LA HOJA						
Hoja	Fibra Larga (4%)					
	Fibra Corta y Bagazo (26,8%)					
	Residuos (96%)	Celulosa (6%)				
		Agua (85%)				
		Mucílago (73,2%)	Parte Orgánica (8%)	Esteroides (1%)		
				Proteínas (2%)		
				Saponinas y Sapogeninas (46%)		
			Minerales (1%)	Azúcares (51%)	Glucosa, sacarosa y fructuosa	
				Potasio (20%), Calcio (19%), Magnesio (10%), Sodio (2%) y otros (49%)		

**Fuente:** Delvasto, S.: Aprovechamiento Integral del Fique [...]. 1995.

### 3.3 POTENCIAL ESTABILIZADOR DEL MUCÍLAGO DE FIQUE

El encarecido mundo del petróleo, dadas las nuevas tecnologías, demanda cada día por nuevos productos más eficientes y menos costosos para la industria; en el campo de la explotación de hidrocarburos, las investigaciones se han enfocado con el fin de disminuir la contaminación generada por esta labor. La búsqueda de sistemas de fluidos de perforación base agua altamente inhibidos con desempeño similar a los fluidos base aceite, ha sido un continuo esfuerzo en la industria de fluidos de perforación. Estos fluidos de alto desempeño, con aditivos tales como supresores de hidratación, supresores de dispersión, supresores de acreción, entre otros, aun demandan por nuevos productos menos costosos y menos contaminantes, que llevan a la realización de investigaciones como la que se propone en este proyecto.

Teniendo en cuenta los estudios<sup>31</sup> realizados, en el Laboratorio de Lodos y Cementos (Escuela de Ingeniería de Petróleos - UIS), para el uso de productos naturales como aditivos en lodos de perforación como sustituto de productos comerciales nocivos al medio ambiente, surge la necesidad de profundizar en el tema en la búsqueda de alcanzar estos objetivos.

El cultivo del fique, ambientalmente, presenta algunos inconvenientes relacionados con la contaminación. Durante el proceso de desfibrado de las hojas, se genera una serie de subproductos los cuales no son utilizados adecuadamente, por lo que se convierten en sustancias contaminantes de las fuentes de agua, debido al lavado de la cabuya (dado que el bagazo y el jugo del fique contienen sustancias tóxicas como las saponinas, que al parecer desplazan el oxígeno disuelto en el agua por el proceso de oxidación, afectando la ictiofauna en las quebradas), y del suelo. *La posible aplicación industrial del mucílago de fique, llevarían a un mejor manejo de estos desechos.*<sup>19</sup>

Además, los productores de fique se encuentran por debajo de la línea de pobreza absoluta, ya que con los ingresos que obtienen por su trabajo, escasamente logran satisfacer las necesidades alimentarias, quedando otras necesidades como la salud, vivienda, educación, servicios públicos y demás, sin solucionar. Esto se debe, a que en la actualidad el sector del fique ha perdido importancia por el ingreso al país de bienes sustitutos, en especial el empaque de yute y el plástico, cuyos precios se encuentran por debajo del empaque de fibra.<sup>36</sup>

La naturaleza de algunos de los componentes del mucílago de fique abre la posibilidad de su aplicación en la producción de aditivos estabilizadores de lutita, específicamente las sales, los azúcares y las saponinas. Además de los

efectos de las sales y los azúcares expuestos en el Capítulo anterior, estudios<sup>13</sup> han encontrado que las saponinas actúan sobre la tensión superficial comportándose como tenso-activos no iónicos (surfactantes), los cuales se emplean en lodos de perforación para controlar el grado de emulsificación, la agregación, la dispersión, etc.

### 3.4 RECOLECCIÓN Y CONSERVACIÓN DEL MUCÍLAGO DE FIQUE

La procedencia y características del mucílago utilizado en esta investigación son descritas en la Tabla 22. Para la obtención del mucílago de fique se emplearon hojas de plantas de fique -*Furcraea macrophylla*. Baker- de la variedad uña de águila y pirulero. Se cortaron longitudinalmente las hojas, en trozos de aproximadamente 30 cms. de largo por 5 cms. de ancho, las cuales se lavaron con agua fresca (ver Figura 68). Posteriormente, las hojas fueron sometidas a extracción por prensado con rodillos (ver Figura 69), los cuales fueron lijados y limpiados con alcohol industrial para evitar la contaminación del mucílago.



**Figura 68. Hojas de fique para obtención del mucílago**



**Figura 69. Prensadora Berstor AF (Lab. Ing. Química - UIS, 2005)**

El mucílago fue refrigerado con el fin de conservar sus propiedades para el desarrollo de las pruebas (Figura 69).



**Figura 70. Refrigeración del mucílago**

El procesamiento general del fique (materia prima y productos) puede verse en la Figura 71.

El mucílago de fique fue sometido a diferentes tratamientos con el fin de determinar, mediante pruebas preliminares, el desempeño de cada uno de sus sub-productos: Mucílago sin filtrar, Mucílago filtrado, Pulpa (residuos sólidos de la filtración) y Pulpa seca (horno regulado a 176°F durante 1 hora). Los resultados de estas pruebas serán presentados en el Capítulo 4.



**Figura 71. Materia prima y productos del proceso de desfibrado**

Se considera pertinente incluir en este Capítulo un seguimiento del deterioro rápido del mucílago de fique, particularmente su proceso de fermentación natural. Esta prueba también pretende evitar su descomposición mediante refrigeración y conservación con Hidróxido de Sodio (NaOH), los cuales son los métodos comúnmente utilizados.<sup>13</sup>

La prueba de degradación se inicio el día 3 de Mayo de 2005 a las 7 de la noche, con mucílago de la Muestra C (ver Tabla 22). El método de control fue visual, con monitoreo del pH, cambio de olor y/o de color cada 24 horas (Figura 72 - 76; Tabla 23 - 27).

Las muestras de mucílago fueron distribuidas de la siguiente manera:

- 1 : Mucílago filtrado + Refrigeración + NaOH,
- 2: Mucílago filtrado + Refrigeración,
- 3: Mucílago filtrado a condición ambiente,
- 4: Mucílago sin filtrar a condición ambiente.

Tabla 22

Propiedades del Mucílago y su Aplicación en la Investigación

MUESTRA	RECOLECCIÓN	CARACTERÍSTICAS	USO
A	Municipio de Curití, Santander. Obtenido de 10 hojas almacenadas a la sombra, cortadas el 07/12/04 a las 11 am y extraído el 14/12/04 a las 9 am	Color: Verde oscuro Densidad: 1,0052 g/ml. pH: 5,5	Pruebas preliminares
B	Municipio de Curití, Santander. Obtenido de 12 hojas almacenadas a la sombra, cortadas el 15/04/05 a las 12 m y extraído el 16/04/05 a las 8 am	Color: Verde oscuro Densidad: 1,008 g/ml. pH: 5,5	Pruebas finales y Deshidratación
C	Municipio de Curití, Santander. Obtenido de 8 hojas almacenadas a la sombra, cortadas el 30/04/05 a las 10 am y extraído el 02/05/05 a las 9 am	Color: Amarillento Densidad: 1,005 g/ml. pH: 5	Deshidratación y Prueba de degradación
D	Municipio de Curití, Santander. Obtenido de 15 hojas almacenadas a la sombra, cortadas el 07/05/05 a las 2 pm y extraído el 10/05/05 a las 3 pm	Color: Verde oscuro Densidad: 1,006 g/ml. pH: 5,5	Pruebas finales

Tabla 23

Prueba de Degradación - Día 1

MUESTRA	pH <sub>i</sub>	NaOH (g)	pH <sub>f</sub>	PRECIPITADO	LIQUIDO SOBRENADANTE	OLOR*
1	4,5	0,3	9,5	Gris	Café	No
2	4,5	-	4,5	-	Verde amarillento	No
3	4,5	-	4,5	-	Verde amarillento	No
4	4,5	-	4,5	Pulpa verdosa	Verde claro	No

\* (No: Olor característico ; Si: Olor fuerte)



Figura 72. Prueba de degradación - Día 1

**Tabla 24**

**Prueba de Degradación - Día 2**

MUESTRA	pH <sub>i</sub>	NaOH (g)	pH <sub>f</sub>	PRECIPITADO	LIQUIDO SOBRENADANTE	OLOR*
1	7	-	7	Verde oscuro	Café claro	No
2	4	-	4	Verde	Verde amarillento	No
3	4	-	4	-	Verde amarillento	No
4	4,5	-	4,5	Pulpa verdosa	Verde claro	No

\* (No: Olor característico ; Si: Olor fuerte)



**Figura 73. Prueba de degradación - Día 2**

**Tabla 25**

**Prueba de Degradación - Día 3**

MUESTRA	pH <sub>i</sub>	NaOH (g)	pH <sub>f</sub>	PRECIPITADO	LIQUIDO SOBRENADANTE	OLOR*
1	4,5	0,3	8,5	Gris	Café oscuro	No
2	3,5	-	3,5	Verde	Verde amarillento	No
3	3,5	-	3,5	-	Turbio	Si
4	3,5	-	3,5	Pulpa verdosa	Verde claro	Si

\* (No: Olor característico ; Si: Olor fuerte)



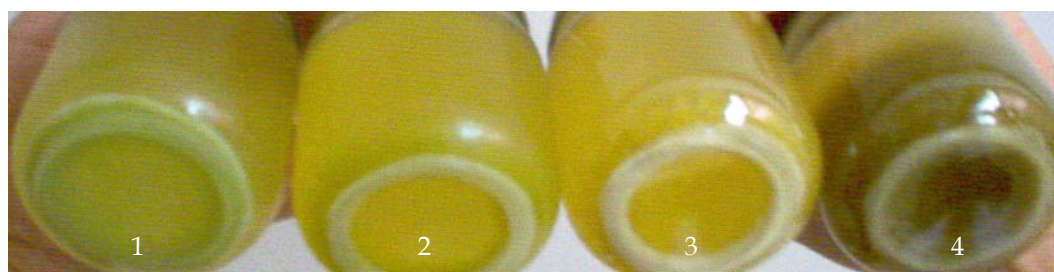
**Figura 74. Prueba de degradación - Día 3**

**Tabla 26**

**Prueba de Degradación - Día 7**

MUESTRA	pH <sub>i</sub>	NaOH (g)	pH <sub>f</sub>	PRECIPITADO	LIQUIDO SOBRENADANTE	OLOR*
1	5,5	0,5	13	Verde y blanco	Verde oscuro	No
2	3,5	-	3,5	Blanco y verde	Verde amarillento	No
3	3,5	-	3,5	Blanco	Turbio	Si
4	3,5	-	3,5	Oscuro y blanco	Verde oscuro	Si

\* (No: Olor característico ; Si: Olor fuerte)



**Figura 75. Prueba de degradación - Día 7**

**Tabla 27**

**Prueba de Degradación - Día 12**

MUESTRA	pH <sub>i</sub>	NaOH (g)	pH <sub>f</sub>	PRECIPITADO	LIQUIDO SOBRENADANTE	OLOR*
1	13	-	13	Verde claro	Rojizo	No
2	3,5	-	3,5	Blanco	Verde amarillento	Si
3	3,5	-	3,5	Blanco y amarillo	Turbio	Si
4	3,5	-	3,5	Oscuro y blanco	Verde oscuro	Si

\* (No: Olor característico ; Si: Olor fuerte)



**Figura 76. Prueba de degradación - Día 12**

En el monitoreo del segundo día se observó un color más turbio en la muestra 3, con respecto a la muestra 2.

Para el día 7, las muestras 3 y 4 ya estaban totalmente descompuestas. Las muestras 1 y 2 siguieron monitoreándose hasta el día 17 sin observarse mayores cambios en ellas. Aunque la elevación del pH, por encima de 10 el cual es el valor recomendado, causó que el mucílago perdiera su color y probablemente también sus propiedades, ya que su pH nunca bajo incluso después de los 45 días.

## 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

### 4.1 RECONOCIMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La búsqueda de sistemas de fluidos base agua altamente inhibidos, los cuales puedan desempeñarse como los sistemas base aceite, ha sido un continuo esfuerzo en la industria de los fluidos de perforación. Muchas aproximaciones han sido probadas con éxitos limitados; también se han diseñado y desarrollado nuevos productos o aditivos para fluidos de perforación base agua, los cuales tienen alto desempeño en la estabilidad de las lutitas, lubricidad, ROP y un menor riesgo en la pega de tubería, pero a altos costos económicos y ambientales.

Uno de los residuos que se obtiene del procesamiento de la planta de fique es el jugo o mucílago de fique, el cual constituye cerca del 70% de la planta y es considerado actualmente como desecho durante la producción de la fibra. Con el fin de encontrar una aplicación de este subproducto, se han hecho investigaciones en la industria farmacéutica y más recientemente en la industria petrolera<sup>31</sup>, donde se sugiere su uso como estabilizador de arcillas.

En base a esta nueva información se plantea conocer el potencial del mucílago del fique como estabilizador de lutitas para evaluar su uso como aditivo en lodos de perforación base agua.

## 4.2 SELECCIÓN DE LOS FACTORES Y SUS NIVELES

**4.2.1 Factores.** Los factores que pueden influir en el desarrollo del experimento son:

**Tabla 28**  
**Factores de Diseño y su Clasificación**

FACTOR	TIPO
Temperatura	Cuantitativo
pH	Cuantitativo
Tipo de lodo	Cualitativo
Tipo de arcilla	Cualitativo
Cantidad de arcilla	Cuantitativo
Tiempo de rolado	Cuantitativo
Concentración del estabilizador	Cuantitativo
Agitación	Cuantitativo
Tipo de estabilizador	Cualitativo
Tipo de mucílago	Cualitativo
Método de extracción	Cualitativo
Operadores	Cualitativo

De los anteriores factores se consideran variables de bloqueo (se fijaron):

- Temperatura<sup>4</sup>: El envejecimiento fue realizado tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, dependiendo del tipo de prueba (BTT: Rolado @ 150°F y medición reológica @  $T_{amb}$ ; Dispersión: Rolado @ 150°F; Acreción: Rolado @  $T_{amb}$ ).
- pH<sup>4</sup>: 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 utilizó un lodo base agua con igual composición para cada tratamiento con el fin de asegurar condiciones constantes y que los resultados fuesen comparativos.
- Tipo de arcilla: Se utilizó bentonita, y ripios de lutitas (formaciones Mito y Carbonera) con problema de arcillas de acuerdo con los requerimientos de cada prueba (BTT: Arcilla hinchable; Dispersión: Lutita dispersable; Acreción: Lutita hinchable con tendencia al bit balling).
- Cantidad de arcilla: Se fijaron dependiendo del tipo de prueba (BTT<sup>41</sup>: 10 lpb de bentonita/adición diaria; Dispersión<sup>4</sup>: 20 gramos de lutita; Acreción: 40 gramos de lutita).
- Tiempo de rolado<sup>4</sup>: El periodo de tiempo necesario para desarrollar más completamente las propiedades del lodo, varía desde pocas horas hasta varios días. Para estas pruebas se hace comúnmente toda la noche (16 horas).
- Agitación: Los hornos de rolado típicamente desarrollan entre 17 y 45 rpm; para buenos resultados todas las pruebas se realizaron con el mismo horno para asegurar condiciones de prueba constantes.
- Tipo de estabilizador: El lodo base fue tratado con KCl (inhibidor estándar) y con mucílago de fique (estabilizador en estudio) para comparar el desempeño relativo de estos tres sistemas.

- Tipo de mucílago: Se trabajó con la variedad de fique *Furcraea macrophylla. Baker*, de la cual se recolectaron hojas del mismo hábitat (cultivo) y con estado de madurez semejante.
- Método de extracción: Con el fin de obtener homogeneidad en las muestras, se utilizará el mismo procedimiento de extracción.
- Operadores: Trabajaron los mismos operadores quienes iniciaron labores a la misma hora del día.

En consecuencia, el factor (variable independiente) que se consideró para el experimento fue la concentración del mucílago (lpb).

Los niveles en que se fijó este factor fueron determinados mediante unas pruebas preliminares que se llevaron a cabo en el Laboratorio de Lodos y Cementos (Escuela de Ingeniería de Petróleos - UIS); en dichas pruebas no se realizó rolado por disponibilidad del equipo, pero los resultados de las mismas fueron representativos del efecto estabilizador del mucílago de fique.

**4.2.2 Niveles.** Pruebas de Tolerancia a la Bentonita (BTT) a temperatura ambiente, fue desarrollada para el mucílago de fique (Muestra A, Tabla 22) y sus sub-productos (mucílago después de ser sometido a diferentes procesos; ver Tabla 29). Como no se tuvo en cuenta el rolado, las adiciones de bentonita se hicieron progresivamente después de agitar a 30 minutos y medir propiedades reológicas.

Los sistemas de fluido utilizados en la primera prueba preliminar son descritos en la Tabla 30.

**Tabla 29**

**Sub-productos del Mucílago de Fique**

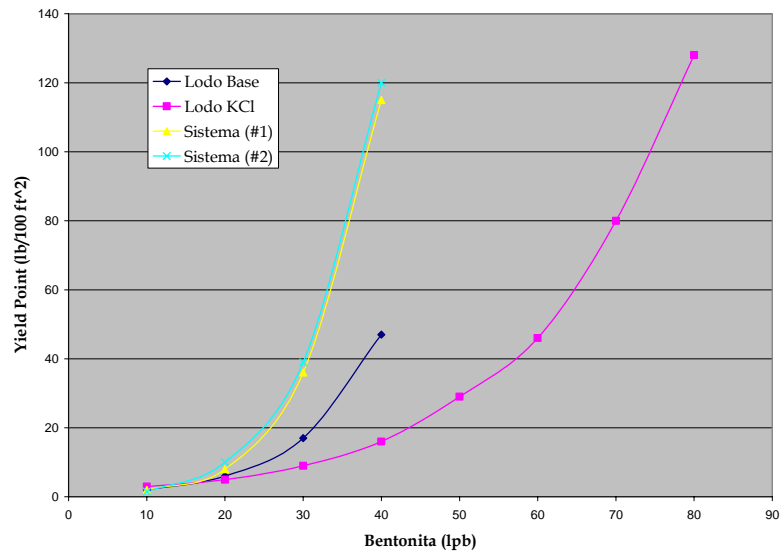
SUB-PRODUCTO	PROCESO
Mucílago Filtrado	Mucílago a través de papel filtro S&S (Ø = 150 mm.)
Pulpa	Recolección de los residuos sólidos del filtrado
Pulpa Seca	Residuos sólidos a 176°F (Horno de secado) durante 1 hora

**Tabla 30**

**Sistemas de Fluido - Prueba Preliminar 1**

FLUIDO	COMPOSICIÓN
Lodo Base	Agua + Bentonita
Lodo KCl	Lodo Base +KCl (8 lpb)
Sistema (#1)	Lodo Base + Mucílago de Fique (8 lpb)
Sistema (#2)	Lodo Base + Mucílago Filtrado (8 lpb)
Sistema (#3)	Lodo Base + Pulpa (8 lpb)
Sistema (#4)	Lodo Base + Pulpa Seca (8 lpb)

Los estudios reológicos y el comportamiento inhibitor de cada sistema en la prueba preliminar 1 se muestran en el Anexo B y en la Figura 77, respectivamente.



**Figura 77. Comportamiento inhibitor - BTT Preliminar 1**

Los Sistemas (#3) y (#4) no fueron evaluados debido a que el antiespumante utilizado, Estereato de Aluminio  $[Al(C_{18}H_{36}O_2)_3]$ , no pudo controlar la excesiva formación de espuma de estos.

De acuerdo con la Figura 77, la concentración del mucílago en los Sistemas (#1) y (#2) fue insuficiente comparado con el efecto inhibitor del KCl, por lo que mayores concentraciones fueron propuestas para realizar una segunda prueba preliminar.

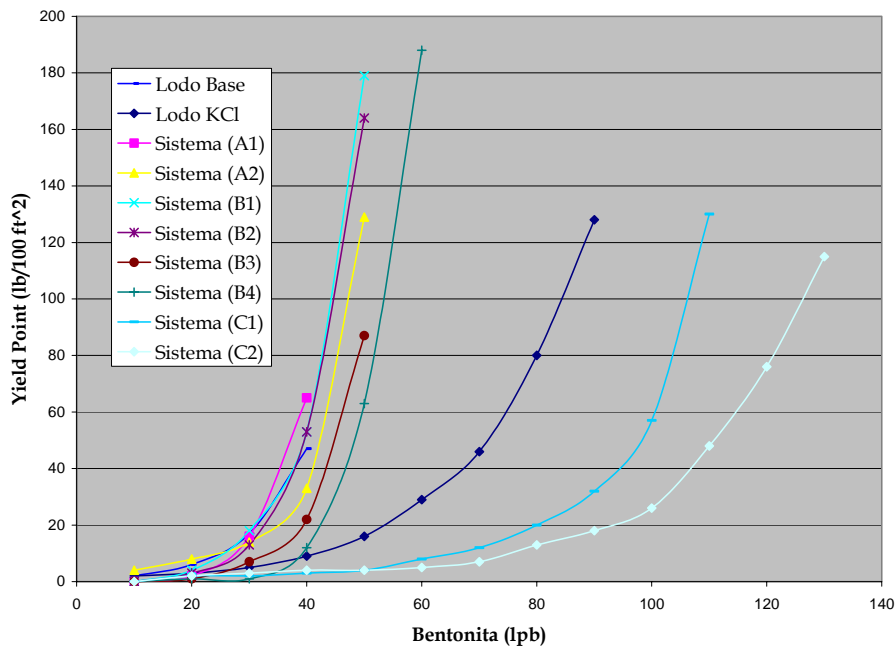
Los sistemas de fluido utilizados en la segunda prueba preliminar son descritos en la Tabla 31.

**Tabla 31**  
**Sistemas de Fluido - Prueba Preliminar 2**

FLUIDO	COMPOSICIÓN
Lodo Base	Agua + Bentonita
Lodo KCl	Lodo Base +KCl
Sistema (A1)	Lodo Base + Mucílago de Figue (10 lpb)
Sistema (A2)	Lodo Base + Mucílago de Figue (20 lpb)
Sistema (A3)	Lodo Base + Mucílago de Figue (30 lpb)
Sistema (B1)	Lodo Base + Mucílago Filtrado (10 lpb)
Sistema (B2)	Lodo Base + Mucílago Filtrado (20 lpb)
Sistema (B3)	Lodo Base + Mucílago Filtrado (30 lpb)
Sistema (B4)	Lodo Base + Mucílago Filtrado (40 lpb)
Sistema (C1)	Agua + Bentonita + Mucílago Filtrado (1/3 bbl eq. Agua)
Sistema (C2)	Agua + Bentonita + Mucílago Filtrado (1/2 bbl eq. Agua)

Teniendo en cuenta el alto contenido de agua en la composición del mucílago de figue (ver Tabla 21), se propuso *reemplazar* una parte del agua del lodo con el agua de este; observe los Sistemas (C1) y (C2).

La reología y el comportamiento inhibitor de cada sistema en la prueba preliminar 2 se muestran en el Anexo C y en la Figura 78, respectivamente.

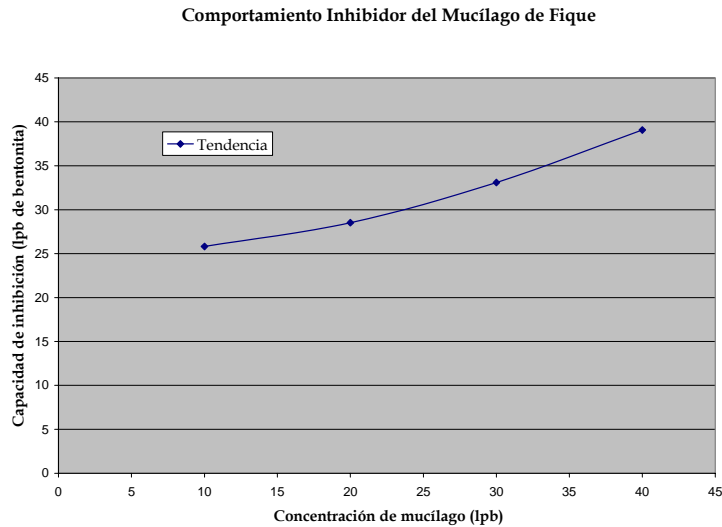


**Figura 78. Comportamiento inhibitor - BTT Preliminar 2**

El Sistema (A3) no fue evaluado debido a que el antiespumante utilizado no pudo controlar la excesiva formación de espuma de este. Normalmente la concentración utilizada de antiespumante es de 0,5 lpb pero no fue suficiente 4 lpb para remediar el problema.

Se observa en la Figura 78 que, para las mismas concentraciones, el mucílago filtrado tiene un desempeño similar al mucílago sin filtrar. Además, la formación de espuma de este fue considerablemente menor; de acuerdo a lo anterior, se decidió que las pruebas finales fueran realizadas con mucílago filtrado. En esta figura también se observa que una concentración de 40 lpb de mucílago filtrado, Sistema (B4), aun no fue suficiente para alcanzar un desempeño similar al del KCl. Debido a la limitada cantidad de mucílago, no se pudieron llevar a cabo más pruebas preliminares, por lo que se ajustó una curva de tendencia que pudiera predecir la cantidad de mucílago de fique

filtrado cuyo desempeño fuera tan efectivo como el del KCl. La Figura 79 muestra el comportamiento de esta aproximación.



**Figura 79. Tendencia del comportamiento inhibidor del mucílago**

Se define capacidad de inhibición del mucílago de fique como la *máxima cantidad de bentonita que puede ser inhibida por una determinada concentración de mucílago filtrado representada por un Yield Point igual a 10*. En lo siguiente, el término FMB /Filtrate Mucilage Baker/ aplicará estrictamente al mucílago de fique filtrado.

La Tabla 32 fue determinada mediante la siguiente ecuación:

$$y \equiv 0,0081x^2 + 0,0366x + 24,612 ; R^2 \equiv 0,9999 \quad (7)$$

Esta ecuación representa la curva de tendencia del comportamiento inhibidor del mucílago de fique.

**Tabla 32**  
**Capacidad de Inhibición del Mucílago de Fique Filtrado**

<b>BENTONITA (lpb)</b>	<b>FMB (lpb)</b>
50	53,7
60	63,9
70	72,6
80	80,46
90	87,62

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 32, y que los sistemas de lodos salados y PHPA/sales manejan concentraciones de sales (inhibidor) de hasta 80 lpb, se sugiere probar con **70 lpb** y **80 lpb** de FMB para evaluar la máxima eficiencia de esta sustancia.

Además, si observamos los resultados preliminares (ver Figura 78) del tratamiento en el cual se utilizó el FMB para reemplazar agua del lodo, se aprecia un mejor comportamiento con respecto al KCl, por lo que también se considero conveniente la evaluación de las siguientes concentraciones:

- 70 lpb de FMB: Reemplazar 1/5 del bbl equivalente de agua por FMB.
- 80 lpb de FMB ≈ Reemplazar 1/4 del bbl equivalente de agua por FMB.
- 120 lpb de FMB ≈ Reemplazar 1/3 del bbl equivalente de agua por FMB.

Esto con el fin de comparar el desempeño del mucílago de fique ya sea *adicionándose* al lodo o *reemplazando* parte del agua de este.

Hasta este punto se ha manifestado la demanda de altas concentraciones de FMB para alcanzar un comportamiento inhibitor de arcillas; esto es debido a la baja concentración de sales que presentan.

A pesar de que en el mucílago de fique, los azúcares se encuentran en mayor proporción que las sales, no hay un efecto considerable de estos sobre la estabilización de las arcillas.

Los azúcares en forma de melazas brindan estabilización cuando aumentan la viscosidad del filtrado del fluido de perforación, como se detalló en el Capítulo 2. Las melazas, son un líquido viscoso de color castaño oscuro que se obtiene como producto secundario en la fabricación del azúcar. Estas son la parte no cristalizable del azúcar y están formadas por un 67% de *sacarosa*, junto con algo de *glucosa* y *fructosa*<sup>18</sup>.

Debido a que la sacarosa, glucosa y fructuosa, también están presentes en el mucílago de fique (ver Tabla 21), se hizo un paralelo entre el procedimiento de obtención de mucílago de fique, realizado en esta investigación, y el de obtención de melaza utilizado en la industria, como se muestra en la Tabla 33.

El procedimiento de obtención de mucílago de fique es compatible con el de obtención de melaza; por tanto, para completar el proceso fue necesario hacer una evaporación directa en estufa de calentamiento cíclico a 105°C. Este proceso fue realizado en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales (Escuela de Química - UIS).

En lo siguiente, el término FMB-Plus aplicará estrictamente al mucílago de fique filtrado deshidratado, ver Figura 80.

**Tabla 33**

**Procedimientos de Obtención del Mucílago de Figue y de Melaza**

MUCÍLAGO DE FIQUE	MELAZA
Extracción del mucílago a través de prensado con rodillos	Extracción del jugo a través de trituración con rodillos
Sedimentación del mucílago para posterior filtrado; separación de la pulpa	Sedimentación del jugo para posterior filtrado de impurezas sólidas
-	Uso de floculante para optimizar el filtrado
Filtrado: Líquido claroscuro con alto contenido de agua; <i>FMB</i>	Filtrado: Líquido claro con alto contenido de agua
-	Evaporación del agua (60%) para concentrar la muestra
-	Centrifugación de la muestra para separar los cristales de la <i>Melaza</i>

Fuente: Aubad, A., et al: Hacia la Química 2. 1985.



**Figura 80. Mucílago de figue filtrado deshidratado (FMB-Plus)**

Por último, otro nivel de concentración a evaluar será el de FMB-Plus (sales más concentradas y azúcares hidrolizados -Melaza-), con el cual se podrá utilizar la recomendada por el procedimiento estándar para la prueba BTT, como se indicó en el Capítulo 2, y la establecida para las demás pruebas como se verá en la sección destinada para la realización del experimento.

### 4.3 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA

La variable dependiente o variable respuesta depende del tipo de prueba que se realice:

- BTT: En esta prueba la variable respuesta es el Yield Point expresado en libras por cien pies cuadrados (lb/100 ft<sup>2</sup>) para los estudios reológicos, y pérdida de filtrado en mililitros (ml) para los estudios de filtrado API.
- Dispersión: En esta prueba la variable respuesta es la cantidad de arcilla no recuperada, expresada en porcentaje de dispersión (% Dispersión).
- Acreción: En esta prueba la variable respuesta es la cantidad de arcilla adherida a la barra, expresada en porcentaje de acreción (% Acreción).

El número de réplicas que se realizaron para cada prueba fue el siguiente:

- BTT: Por disponibilidad de mucílago de fique (costos) y por la duración de la prueba, se realizaron dos réplicas.
- Dispersión: Se realizaron tres réplicas para esta prueba.
- Acreción: Se realizó una réplica de ésta prueba.

#### 4.4 SELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Teniendo en cuenta que el diseño es unifactorial, que se harán igual número de réplicas por tratamiento y que los niveles del factor son fijos (escogidos de una prueba preliminar), el diseño que mejor se adapta a las condiciones expuestas es el Diseño Completamente Aleatorizado (DCA). Y el análisis de varianza a utilizar será el ANOVA de clasificación simple (de una vía), con grupos iguales para diseños balanceados y de modelo tipo I o más comúnmente llamado de efectos fijos<sup>14</sup>. Finalmente, la comparación de medias por pares se hará mediante el Método de Tukey -DHS<sup>24</sup>.

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

$$y_{ij} \equiv \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

Donde:  $i = 1, 2, \dots, r$  réplicas;  $j = 1, 2, \dots, k$  tratamientos;  $y_{ij}$  representa la observación de la repetición  $i$ -ésima en el tratamiento  $j$ -ésimo;  $\mu$  es la media global de las réplicas de un mismo nivel;  $\tau_j$  es el efecto producido por el tratamiento  $j$ -ésimo y  $\varepsilon_{ij}$  es el error experimental aleatorio en la observación  $y_{ij}$ .

## 4.5 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

Las pruebas finales que se realizaron para evaluar el potencial estabilizador de lutita del FMB y el FMB-Plus, son descritas en esta sección.

**4.5.1 Prueba de Tolerancia a la Bentonita.** Esta prueba se realizó con el mucílago de las Muestras B y D, ver Tabla 22. Para los estudios reológicos, en la primera réplica se evaluó el potencial del FMB como supresor de hidratación, y en la segunda réplica se estableció el rango óptimo de pH en el que trabaja este producto. De acuerdo a lo anterior, como las réplicas no se realizaron con los mismos parámetros operacionales (pH), esta prueba no está contemplada dentro del análisis estadístico del diseño experimental.

Los estudios de filtrado API, cuyas dos réplicas se realizaron con los mismos parámetros operacionales, están contemplados dentro del análisis estadístico del diseño experimental.

**4.5.1.1 Estudios Reológicos.** Los sistemas de fluido utilizados en la prueba final BTT 1 son descritos en la Tabla 34.

**Tabla 34**

**Sistemas de Fluido - Prueba Final BTT 1**

FLUIDO	COMPOSICIÓN
Lodo Base	Agua + Bentonita
Lodo KCl	Lodo Base +KCl
FMB #1	Lodo Base + FMB (70 lpb)
FMB #2	Lodo Base + FMB (80 lpb)
FMB #3	Agua + Bentonita + FMB (1/5 bbl eq. Agua)
FMB #4	Agua + Bentonita + FMB ( $\approx 1/4$ bbl eq. Agua)
FMB #5	Agua + Bentonita + FMB ( $\approx 1/3$ bbl eq. Agua)
FMB #6	Lodo Base + FMB-Plus

Las Figuras 81 y 82 muestran el comportamiento inhibitor de cada sistema (Tabla 34).

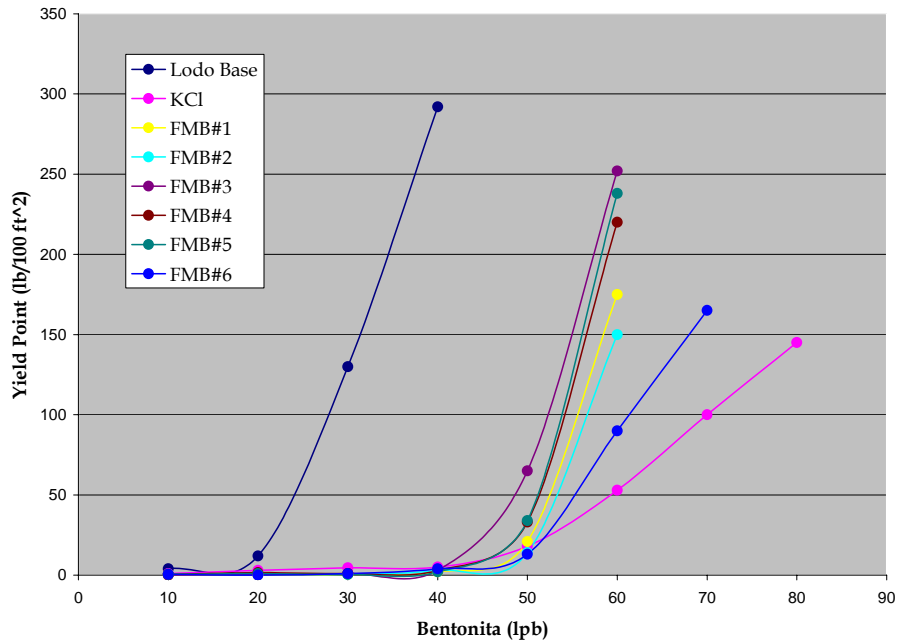


Figura 81. Comportamiento inhibitor - BTT Final 1

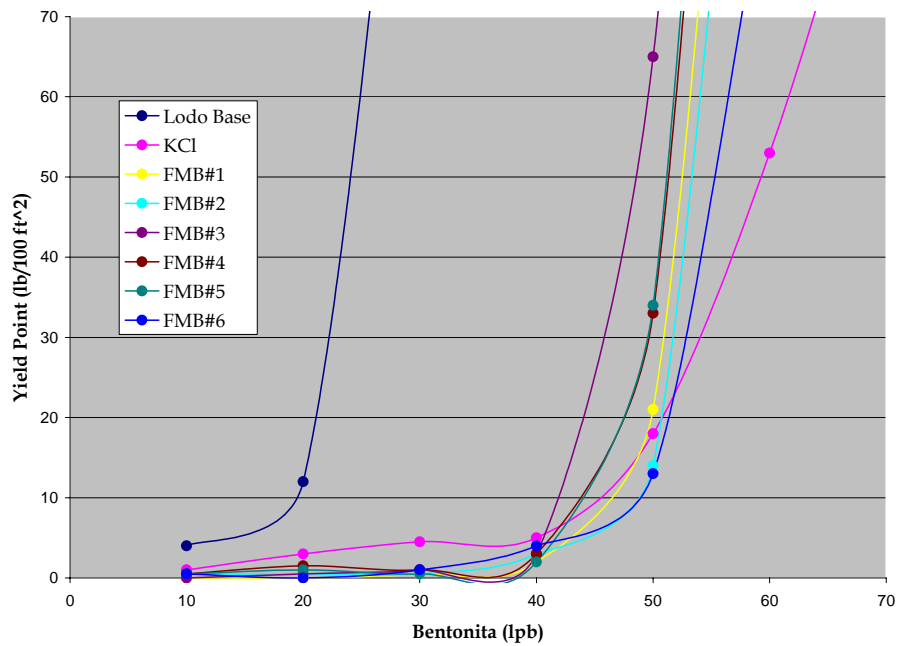


Figura 82. Comportamiento inhibitor - BTT Final 1 (Ampliada)

Se observa que los fluidos FMB #1, FMB #2 y FMB #6, alcanzan un comportamiento inhibitor similar al del KCl, siendo este último el de más eficiencia entre los sistemas FMB.

Las formulaciones y los resultados de los estudios reológicos para la prueba de las Figuras 81 y 82, se muestran en el Anexo D.

Los sistemas de fluido utilizados en la prueba final BTT 2 son descritos en la Tabla 35.

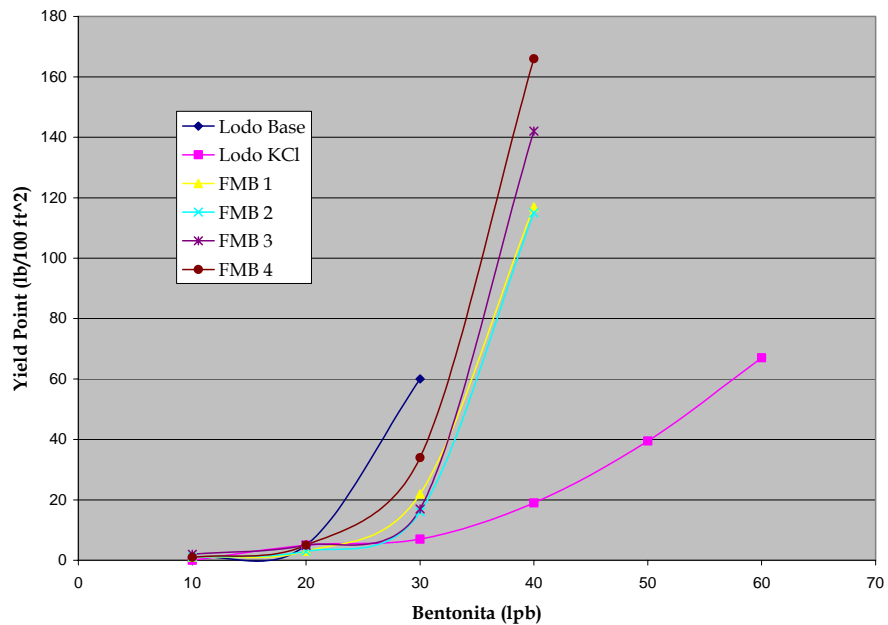
**Tabla 35**  
**Sistemas de Fluido - Prueba Final BTT 2**

<b>FLUIDO</b>	<b>COMPOSICIÓN</b>
<b>Lodo Base</b>	Agua + Bentonita
<b>Lodo KCl</b>	Lodo Base +KCl
<b>FMB #1</b>	Lodo Base + FMB (70 lpb)
<b>FMB #2</b>	Lodo Base + FMB (80 lpb)
<b>FMB #3</b>	Agua + Bentonita + FMB (1/5 bbl eq. Agua)
<b>FMB #4</b>	Agua + Bentonita + FMB ( $\approx$ 1/4 bbl eq. Agua)

La Figura 83 muestra el comportamiento inhibitor de cada sistema para esta prueba.

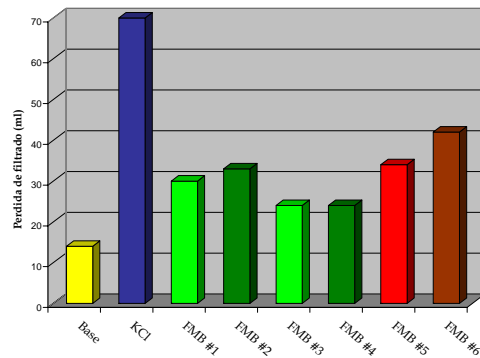
Para la prueba final BTT 2 se utilizaron rangos de pH entre 11 y 12. Se observa en la Figura 83 el efecto adverso de pH altos sobre el comportamiento inhibitor de las sales; esto se debe a que el pH óptimo<sup>12</sup> de operación, para este tipo de inhibidores, es 10.

Las formulaciones y los resultados de los estudios reológicos para la prueba de la Figura 83, se muestran en el Anexo E.



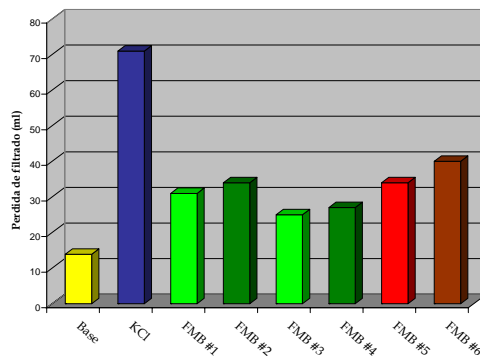
**Figura 83. Efectos del pH sobre el comportamiento inhibitor - BTT Final 2**

**4.5.1.2 Estudios de Filtrado API.** Las Figuras 84 y 85 muestran los estudios (2 réplicas) de filtrado API para cada sistema de la Tabla 34, los cuales fueron utilizados para esta prueba.



**Figura 84. Efectos de la perdida de filtrado - Réplica 1**

Las formulaciones y los resultados de los estudios de filtrado API se muestran en el Anexo F.



**Figura 85. Efectos de la pérdida de filtrado – Réplica 2**

**4.5.2 Prueba de Dispersión.** Esta prueba se realizó con el mucílago de la Muestra D (ver Tabla 22). Para evaluar el comportamiento del FMB como supresor de dispersión se utilizaron ripios de una lutita (formación Mito) que presentaba alto grado de derrumbamiento y un fluido de perforación parcialmente formulado con un perfil reológico bajo (dentro del rango permitido) que evitara la alteración de los resultados de la prueba.

Una formulación de un lodo inhibido (5% w/w KCl) fue empleado para este propósito, donde el KCl fue sustituido por el FMB a fin de evaluar la eficiencia relativa de cada producto.

Los sistemas de fluido utilizados en la prueba de dispersión son descritos en la Tabla 36.

Las Figuras 86, 87 y 88 muestran la tendencia a suprimir la dispersión de los diferentes sistemas de la Tabla 36. Las formulaciones, perfil reológico y resultados de la prueba de dispersión se muestran en el Anexo G.

Tabla 36

Sistemas de Fluido - Prueba de Dispersión

FLUIDO	COMPOSICIÓN
Agua	-
Lodo KCl	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH + KCl (5% w/w)
L.I.* FMB #1	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH + FMB (80 lpb)
L.I.* FMB #2	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH + FMB (≈ 1/4 bbl eq. Agua)
L.I.* FMB #3	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH + FMB-Plus (5% w/w)
L.I.* FMB #4	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH + FMB (≈ 1/3 bbl eq. Agua)

Fuente: MILPARK DRILLING FLUIDS: Mudfacts Engineering Handbook. 1990.

\*: Lodo Inhibido; Pac = Celulosa Poli aniónica.

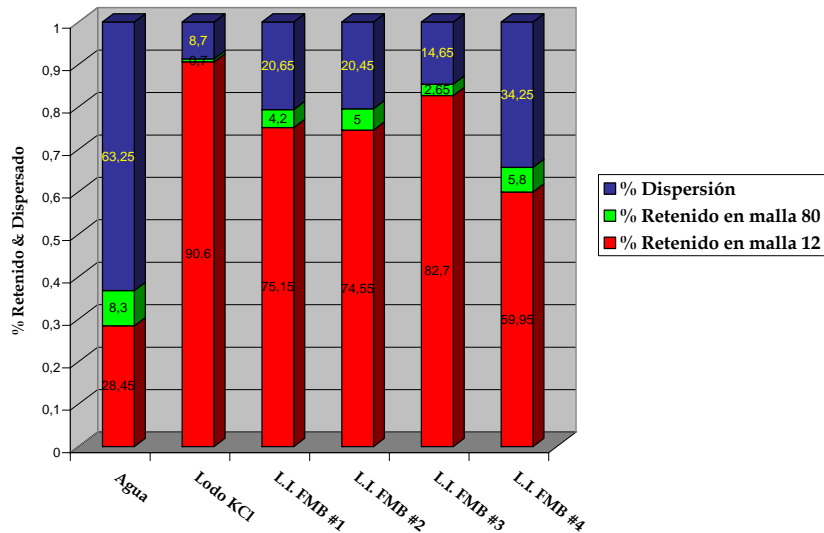


Figura 86. Prueba de dispersión - Réplica 1

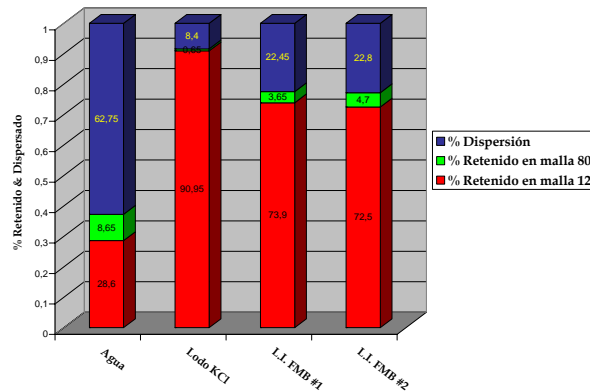
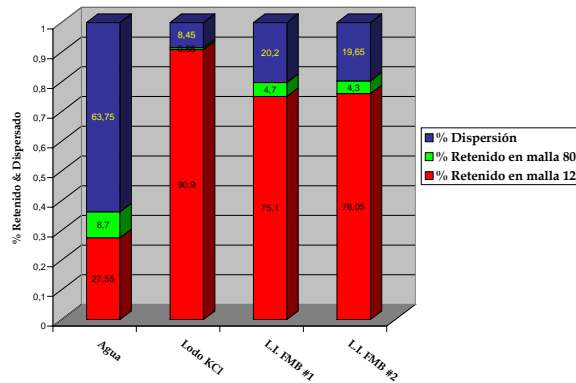


Figura 87. Prueba de dispersión - Réplica 2



**Figura 88. Prueba de dispersión - Réplica 3**

Para los Sistemas L.I. FMB #3 y L.I. FMB #4 se hizo solo una réplica, debido a la poca disponibilidad de mucílago.

Se aprecia el buen comportamiento de los sistemas de lodo inhibido FMB como supresor de dispersión, siendo el FMB-Plus el que proporciona un mejor desempeño al reemplazar el KCl.

**4.5.3 Prueba de Acreción.** Esta prueba se realizó con el mucílago de la Muestra D (ver Tabla 22). Para evaluar el comportamiento del FMB como supresor de acreción se utilizaron ripios de una lutita (formación Carbonera) con tendencia al bit balling y un fluido de perforación parcialmente formulado.

Se utilizó el mismo lodo inhibido de la prueba de dispersión, pero su formulación debió ser levemente variada porque la concentración de polímeros (especialmente el XC Polímero<sup>8</sup>) alteraba la acreción de las partículas de lutita, impidiendo hacer una real comparación entre los efectos del KCl y el FMB. Además, las barras de acero inoxidable no pudieron ser

utilizadas, debido a que este material hizo que la adherencia de la lutita no fuese significativa.

La Figura 89 muestra el efecto de los aditivos poliméricos sobre la acreción de las partículas de lutita. En el Anexo H se muestran las formulaciones y la reología de los fluidos comparados en la prueba.



**Figura 89. Efecto del polímero sobre la acreción de partículas**

En la Figura 89 se aprecia un mayor recubrimiento de la barra para una concentración de 0,5 lpb de XC Polímero comparado con el que resulta para una concentración de 1,0 lpb. Esto probablemente se debe al efecto encapsulante de los polímeros.

La Tabla 37 muestra los sistemas de fluido utilizados para la prueba de acreción.

**Tabla 37**

**Sistemas de Fluido - Prueba de Acreción**

FLUIDO	COMPOSICIÓN
Lodo Base	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH
Lodo KCl	Lodo Base + KCl (5% w/w)
L.I.* FMB #1	Lodo Base + FMB (80 lpb)
L.I.* FMB #2	Lodo Base + FMB ( $\approx 1/4$ bbl eq. Agua)
L.I.* FMB #3	Lodo Base + FMB-Plus (5% w/w)

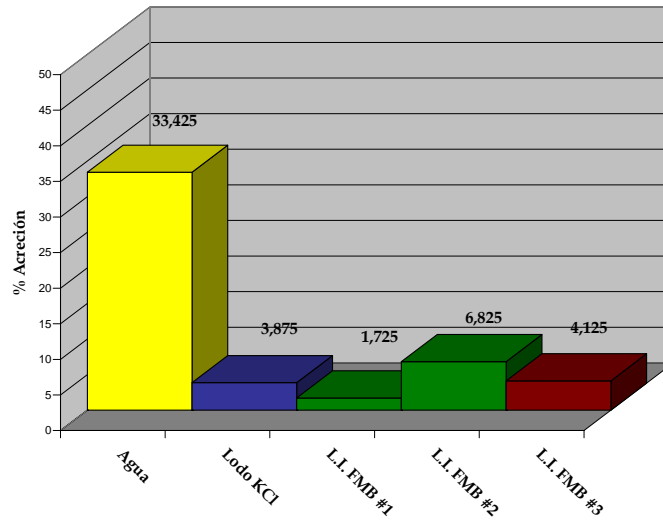
\*: Lodo Inhibido; Pac = Celulosa Poli aniónica.

Las Figuras 90 y 91 muestran la tendencia a suprimir la acreción de los diferentes sistemas de la Tabla 37. Las formulaciones, perfil reológico y resultados de la prueba de la acreción se muestran en el Anexo I.



**Figura 90. Fotos de acreción**

Se aprecia el buen comportamiento de los sistemas de lodo inhibido FMB como supresor de acreción, siendo el FMB #1 el que proporciona el mejor desempeño comparado con el KCl y el FMB #3 con un comportamiento similar al del KCl.



**Figura 91. Prueba de acreción**

**4.5.4 Pruebas Complementarias.** Estas pruebas se realizaron con el mucílago de la Muestra D (ver Tabla 22).

**4.5.4.1 Prueba de Compatibilidad.** La Tabla 38 muestra los sistemas de fluido utilizados para esta prueba.

**Tabla 38**

**Sistemas de Fluido - Prueba de Compatibilidad**

FLUIDO	COMPOSICIÓN
Lodo Base	Agua + Bentonita + XC Polímero + Pac + NaOH
Lodo KCl	Lodo Base + KCl (5% w/w)
L.I.* FMB #1	Lodo Base + FMB (80 lpb)
L.I.* FMB #3	Lodo Base + FMB-Plus (5% w/w)

\*: Lodo Inhibido; Pac = Celulosa Poli aniónica.

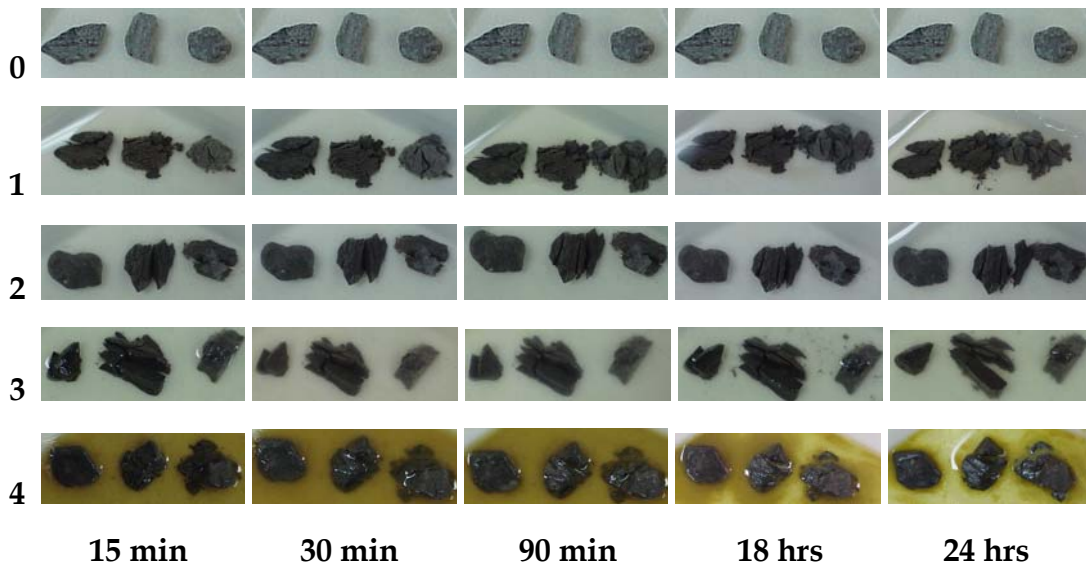
Esta prueba demuestra que el FMB no causa pérdida de las propiedades reológicas originales del lodo. Las formulaciones y los resultados son mostrados en el Anexo J.

**4.5.4.2 Prueba de Exposición Simplificada.** Esta prueba permite tener una observación visual de la degradación de la lutita al contacto con el fluido de perforación o con el producto especializado en su estabilización.

Ripios de lutita de la formación Mito fueron puestos en contacto con los sistemas mostrados en la Tabla 39.

**Tabla 39**  
**Sistemas de Fluido - Prueba de Exposición Simplificada**

FLUIDO	COMPOSICIÓN
0	Lutita inicial
1	100 ml de agua
2	100 ml de una solución acuosa de KCl (5% w/w)
3	100 ml de una solución acuosa de FMB (80 lpb)
4	100 ml de una solución acuosa de FMB-Plus (5% w/w)



**Figura 92. Fotos de exposición simplificada**

A los 15 minutos, la lutita ya estaba dispersa en el Fluido 1; para los demás fluidos, al entrar el agua la lutita falla por los planos más débiles pero

permanece compacta debido al efecto estabilizador de los fluidos. Se observa que el Fluido 4 es el que mejor se comporta junto con el Fluido 2.

Esta prueba corrobora aún más los resultados obtenidos en la prueba de dispersión.

#### 4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

El paquete de análisis estadístico STATGRAPHICS® PLUS 5.1 fue utilizado en este proyecto para realizar todos los cálculos que se necesitaron. La Figura 93 muestra la ventana principal de este paquete de análisis estadístico<sup>42</sup>.

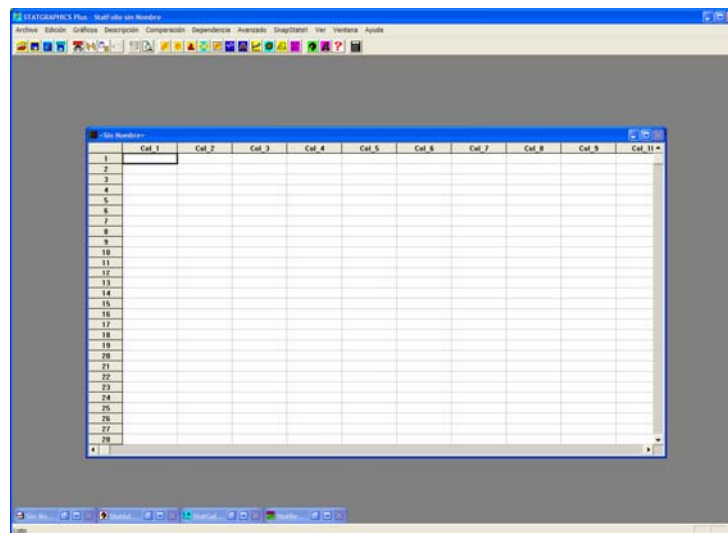


Figura 93. Ventana principal del STATGRAPHICS® PLUS 5.1.

**4.6.1 Prueba de Tolerancia a la Bentonita (Estudios de Filtrado API).** El siguiente procedimiento realiza un análisis de varianza simple para la Pérdida de Filtrado (en mililitros). Para que el diseño sea completamente aleatorizado, se requiere, en primer lugar, preparar los sistemas de fluido a evaluar y medir la Pérdida de Filtrado, de manera estrictamente aleatorizada.

Realizado el experimento, se tiene la Pérdida de Filtrado para los ocho diferentes niveles de tratamiento (Agua, Lodo KCl, FMB #1, FMB #2, FMB #3 FMB #4, FMB #5 y FMB #6) los cuales serán analizados estadísticamente. La Tabla 40 resume los datos estadísticos de cada tratamiento.

**Tabla 40**

**Resumen Estadístico para la Prueba BTT (Estudios de Filtrado API)**

RÉPLICA	AGUA	KCl	FMB #1	FMB #2	FMB #3	FMB #4	FMB #5	FMB #6	
1	14	70	30	33	24	24	34	42	
2	13,9	71	31	34	25	27	34	40	
<b>Frecuencia</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	16
<b>Totales</b>	27,9	141	61	67	49	51	68	82	546,9
<b>Media</b>	13,95	70,5	30,5	33,5	24,5	25,5	34	41	34,18
<b>Varianzas</b>	0,005	0,5	0,5	0,5	0,5	4,5	0,0	2,0	
<b>Rango</b>	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	3,0	0,0	2,0	

En segundo lugar, se realizan varias pruebas (ANOVA) para comparar los valores medios de la Pérdida de Filtrado para los ocho diferentes niveles de tratamiento a ser evaluados. Toda la información sobre el ANOVA para los estudios de filtrado API se recoge en la Tabla 41.

**Tabla 41**

**Análisis de Varianza para los Estudios de Filtrado API -ANOVA-**

FUENTE DE VARIACIÓN	SC	GL	MC	F	P
<b>Entre tratamientos</b>	3915,98	7	559,426	526,21	0,0000
<b>Dentro de tratamientos</b>	8,505	8	1,06312		
<b>Total</b>	3924,48	15			

SC: Suma de Cuadrados; GL: Grados de Libertad; MC: Medias Cuadráticas

La tabla ANOVA descompone la varianza de la Pérdida de Filtrado en dos componentes: un componente entre tratamientos y un componente dentro de ellos. La prueba F en la tabla de ANOVA comprobará si hay alguna diferencia significativa entre las medias de los tratamientos.

El valor P en la Tabla 41 indica la probabilidad que el estadístico F con 7 y 8 grados de libertad sea mayor que  $F_0 = 526,21$  de la prueba. Puesto que el valor de P de la prueba F es inferior a 0,01, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la Pérdida de Filtrado de un nivel de tratamiento a otro para un nivel de confianza del 99,0%.

**Tabla 42**

**Diferencias entre las Medias para los Estudios de Filtrado API -Tukey-**

COMPARACIÓN	DIFERENCIAS	ICS DEL 95%	¿DIFERENTE?
Agua - FMB #1	16,55	(12,46 - 20,64)	Sí
Agua - FMB #2	19,55	(15,46 - 23,64)	Sí
Agua - FMB #3	10,55	(6,46 - 14,64)	Sí
Agua - FMB #4	11,55	(7,46 - 15,64)	Sí
Agua - FMB #5	20,05	(15,96 - 24,14)	Sí
Agua - FMB #6	27,05	(22,96 - 31,14)	Sí
Agua - KCl	56,55	(52,46 - 60,64)	Sí
FMB #1 - FMB #2	3,0	(-1,09 - 7,09)	No
FMB #1 - FMB #3	6,0	(1,91 - 10,09)	Sí
FMB #1 - FMB #4	5,0	(0,91 - 9,09)	Sí
FMB #1 - FMB #5	3,5	(-0,59 - 7,59)	No
FMB #1 - FMB #6	10,5	(6,41 - 14,59)	Sí
FMB #1 - KCl	40,0	(35,91 - 44,09)	Sí
FMB #2 - FMB #3	9,0	(4,91 - 13,09)	Sí
FMB #2 - FMB #4	8,0	(3,91 - 12,09)	Sí
FMB #2 - FMB #5	0,5	(-3,59 - 4,59)	No
FMB #2 - FMB #6	7,5	(3,41 - 11,59)	Sí
FMB #2 - KCl	37,0	(32,91 - 41,09)	Sí
FMB #3 - FMB #4	1,0	(-3,09 - 5,09)	No
FMB #3 - FMB #5	9,5	(5,41 - 13,59)	Sí
FMB #3 - FMB #6	16,5	(12,41 - 20,59)	Sí
FMB #3 - KCl	46,0	(41,91 - 50,09)	Sí
FMB #4 - FMB #5	8,5	(4,41 - 12,59)	Sí
FMB #4 - FMB #6	15,5	(11,41 - 19,59)	Sí
FMB #4 - KCl	45,0	(40,91 - 49,09)	Sí
FMB #5 - FMB #6	7,0	(2,91 - 11,09)	Sí
FMB #5 - KCl	36,5	(32,41 - 40,59)	Sí
FMB #6 - KCl	29,5	(25,41 - 33,59)	Sí

ICS: Intervalos de Confianza Simultáneos.

Al concluir que existen diferencias, un método de comparación de medias por pares indicará las medias que son significativamente diferentes unas de otras y estimará su diferencia. Para estos estudios de filtrado API, se utilizará el Método de Tukey, DHS. Con este método hay un 5,0% de riesgo de considerar uno o más pares como significativamente diferentes cuando su diferencia real es igual a 0. Ver Tabla 42.

Para estos estudios de filtrado API, la diferencia absoluta excede DHS (0,05) = 4,08638. La Tabla 42 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. La segunda columna muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Los pares de medias que tengan *Sí* en la última columna, indica que éstos muestran diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95,0%.

**Tabla 43**  
**Medias, Errores Estándar e Intervalos de Confianza del 95% para los Estudios de Filtrado API**

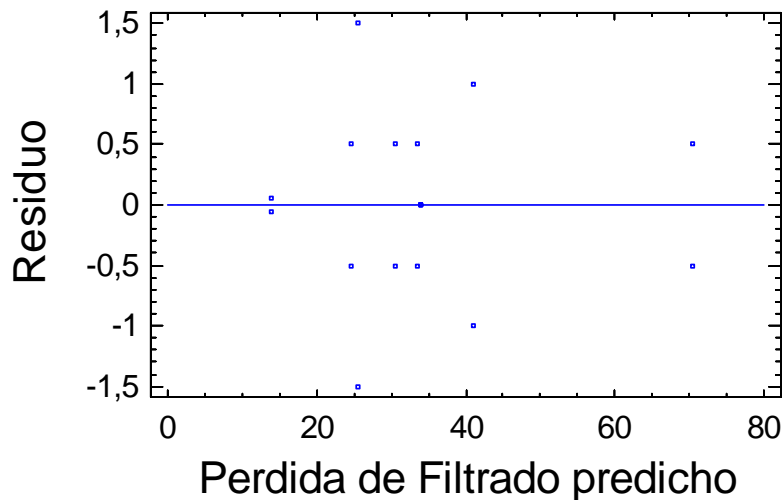
TRATAMIENTO	MEDIA	ERROR ESTÁNDAR	IC DEL (95%)
Agua	13,95	0,729	13,95% ± 1,68
Lodo KCl	70,5	0,729	70,5% ± 1,68
FMB #1	30,5	0,729	30,5% ± 1,68
FMB #2	33,5	0,729	33,5% ± 1,68
FMB #3	24,5	0,729	24,5% ± 1,68
FMB #4	25,5	0,729	25,5% ± 1,68
FMB #5	34	0,729	34% ± 1,68
FMB #6	41	0,729	41% ± 1,68

Las medias entre los tratamientos FMB #1 y FMB #2; FMB #1 y FMB #5; FMB #2 y FMB #5; FMB #3 y FMB #4 no muestran diferencias estadísticamente significantes. Se identifican, por lo tanto, cinco grupos de tratamientos

homogéneos: Agua; FMB #3 y FMB #4; FMB #1, FMB #2 y FMB #5; FMB #6; KCl. Es de anotar, la menor diferencia que existe entre el tratamiento FMB # 6 con el del Lodo KCl.

En la Tabla 43, se muestra el error estándar y los intervalos de confianza para cualquier media de tratamiento.

Finalmente, los diferentes gráficos propuestos por los análisis estadísticos, ayudan a juzgar la significación práctica de los resultados, y permiten buscar las posibles violaciones a las asunciones subyacentes en el análisis de la varianza. La Figura 94 muestra los residuos frente a los niveles predichos de la Pérdida de Filtrado.



**Figura 94. Valores residuales de los estudios de filtrado API**

En la figura anterior, los residuos son iguales a los valores observados de la Pérdida de Filtrado menos el valor medio de la Pérdida de Filtrado para el tratamiento del que proceden y los valores predichos son iguales a las medias de los ocho niveles de tratamiento. Este gráfico es útil para la detección de heteroscedasticidad, en la cual la varianza de la Pérdida de Filtrado cambia

junto con la media. Si los puntos forman un modelo con forma de embudo, indica un tipo de heteroscedasticidad la cual no se presenta en este caso debido a que los puntos se encuentran distribuidos al azar, demostrando así una verdadera independencia entre los errores aleatorios y la variable dependiente, en este caso la Pérdida de Filtrado.

**4.6.2 Prueba de Dispersión.** El siguiente procedimiento realiza un análisis de varianza simple para el % Dispersión. Para que el diseño sea completamente aleatorizado, se requiere, en primer lugar, preparar los sistemas de fluido a evaluar y medir el % Dispersión, de manera estrictamente aleatorizada. Realizado el experimento, se tiene el % Dispersión para los seis diferentes niveles de tratamiento (Agua, Lodo KCl, L.I. FMB #1, L.I. FMB #2, L.I. FMB #3 y L.I. FMB #4) los cuales solo serán analizados los cuatro primeros, ya que de los otros dos tratamientos solo se tiene una sola réplica y analizarlos conllevaría a un alto nivel de significación de la prueba,  $\alpha$  (error de tipo I) y una baja potencia de la prueba (error de tipo II). La Tabla 44 resume los datos estadísticos de cada tratamiento.

**Tabla 44**

**Resumen Estadístico para la Prueba de Dispersión**

RÉPLICA	AGUA	LODO KCl	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	
1	63,25%	8,7%	20,65%	20,45%	
2	62,75%	8,4%	20,45%	22,8%	
3	63,75%	8,45%	20,2%	19,65%	
<b>Frecuencia</b>	3	3	3	3	12
<b>Totales</b>	189,75	25,55	61,3	62,9	339,5
<b>Media</b>	63,25%	8,51667%	21,1%	20,9667%	28,4583%
<b>Varianzas</b>	0,25	1,4175	2,68083	0,0258333	
<b>Rango</b>	1	0,3	2,25	3,15	

En segundo lugar, se realizan varias pruebas (ANOVA) para comparar los valores medios del % Dispersión para los cuatro diferentes niveles de tratamiento a ser evaluados. Toda la información sobre el ANOVA para la prueba de dispersión se recoge en la Tabla 45.

**Tabla 45**

**Análisis de Varianza para la Prueba de Dispersión -ANOVA-**

FUENTE DE VARIACIÓN	SC	GL	MC	F	P
Entre tratamientos	5155,2	3	1718,4	1751,41	0,0000
Dentro de tratamientos	8,74833	8	1,09354		
Total	5163,95	11			

SC: Suma de Cuadrados; GL: Grados de Libertad; MC: Medias Cuadráticas

La tabla ANOVA descompone la varianza del % Dispersión en dos componentes: un componente entre tratamientos y un componente dentro de ellos. La prueba F en la tabla de ANOVA comprobará si hay alguna diferencia significativa entre las medias de los tratamientos.

El valor P en la Tabla 45 indica la probabilidad que el estadístico F con 3 y 8 grados de libertad sea mayor que  $F_0 = 1751,4$  de la prueba. Puesto que el valor de P de la prueba F es inferior a 0,01, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias del % Dispersión de un nivel de tratamiento a otro para un nivel de confianza del 99,0%.

Al concluir que existen diferencias, un método de comparación de medias por pares indicará las medias que son significativamente diferentes unas de otras y estimará su diferencia. Para esta prueba de dispersión, se utilizará el Método de Tukey, DHS. Con este método hay un 5,0% de riesgo de

considerar uno o más pares como significativamente diferentes cuando su diferencia real es igual a 0. Ver Tabla 46.

**Tabla 46**

**Diferencias entre las Medias para la Prueba de Dispersión -Tukey-**

COMPARACIÓN	DIFERENCIAS	ICS DEL 95%	¿DIFERENTE?
Agua - L.I. FMB #1	42,15	(39,42 - 44,88)	Sí
Agua - L.I. FMB #2	42,2833	(39,55 - 45,01)	Sí
Agua - Lodo KCl	54,7333	(52,00 - 57,47)	Sí
L.I. FMB #1 - L.I.* FMB #2	0,133333	(-2,59 - 2,87)	No
L.I. FMB #1 - Lodo KCl	12,5833	(9,85 - 15,32)	Sí
L.I. FMB #2 - Lodo KCl	12,45	(9,72 - 15,18)	Sí

ICS: Intervalos de Confianza Simultáneos

Para esta prueba de dispersión, la diferencia absoluta excede DHS (0,05) = 2,73329. La Tabla 46 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. La segunda columna muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Los pares de medias que tengan *Sí* en la última columna, indica que éstos muestran diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95,0%. Las medias entre los tratamientos L.I. FMB #1 y L.I. FMB #2 no muestran diferencias estadísticamente significantes. Se identifica, por lo tanto, tres grupos de tratamientos homogéneos: Agua; L.I. FMB #1 y L.I. FMB #2; KCl. Es de anotar, la menor diferencia que existe entre los tratamientos L.I. FMB #1 y L.I. FMB #2 con el del Lodo KCl.

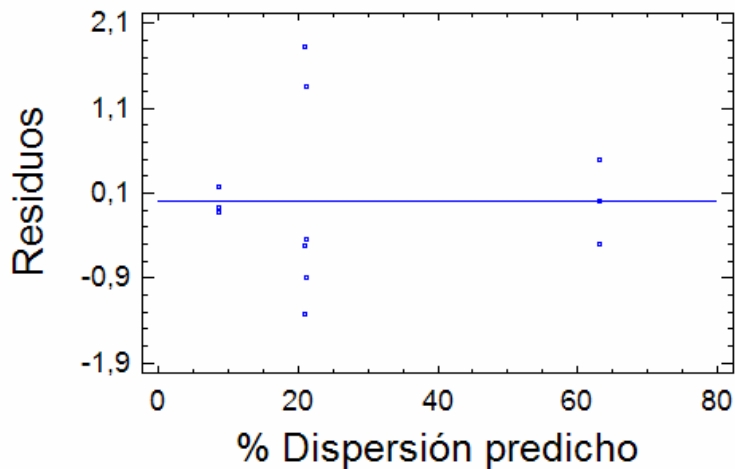
En la Tabla 47, se muestra el error estándar y los intervalos de confianza para cualquier media de tratamiento.

**Tabla 47**

**Medias, Errores Estándar e Intervalos de Confianza del 95% para la Prueba de Dispersión**

TRATAMIENTO	MEDIA	ERROR ESTÁNDAR	IC DEL (95%)
Agua	63,25%	0,60375	63,25% ± 1,39
Lodo KCl	8,51667%	0,60375	8,51667% ± 1,39
L.I. FMB #1	21,1%	0,60375	21,1% ± 1,39
L.I. FMB #2	20,9667%	0,60375	20,9667% ± 1,39

Finalmente, los diferentes gráficos propuestos por los análisis estadísticos, ayudan a juzgar la significación práctica de los resultados, y permiten buscar las posibles violaciones a las asunciones subyacentes en el análisis de la varianza. La Figura 95 muestra los residuos frente a los niveles predichos del % Dispersión.



**Figura 95. Valores residuales de la prueba de dispersión**

En la figura anterior, los residuos son iguales a los valores observados del % Dispersión menos el valor medio del % Dispersión para el tratamiento del que proceden y los valores predichos son iguales a las medias de los cuatro

niveles de tratamiento. Este gráfico es útil para la detección de heteroscedasticidad, en la cual la varianza del % Dispersión cambia junto con la media. Si los puntos forman un modelo con forma de embudo, indica un tipo de heteroscedasticidad la cual no se presenta en este caso debido a que los puntos se encuentran distribuidos al azar, demostrando así una verdadera independencia entre los errores aleatorios y la variable dependiente, en este caso el % Dispersión.

## 5. CONCLUSIONES

- 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 estabilizadores utilizados en este proyecto, observando que en la prueba BTT (Estudios de Filtrado API) se generaron cinco grupos homogéneos, del cual el FMB-Plus es el que tiene una menor diferencia significativa con el KCl y en la prueba de dispersión se generaron tres grupos homogéneos, del cual los FMB tienen una apreciable diferencia con el KCl.
- En las pruebas BTT se hizo evidente el comportamiento como supresor de hidratación del FMB (mucílago filtrado de fique) adicionándosele al lodo en una concentración de 70 lpb u 80 lpb y del FMB-Plus (mucílago filtrado de fique deshidratado) a la concentración que exige la prueba (8 lpb), cuyo desempeño fue similar al mostrado por el KCl, el cual es considerado un buen supresor de hidratación.
- En la prueba de dispersión el FMB y el FMB-Plus mostró un desempeño aceptable como supresor de dispersión, siendo este último el que presenta el comportamiento más próximo al del KCl a la misma concentración de este.
- En la prueba de acreción se mostró que el FMB y el FMB-Plus tienen un buen desempeño como supresor de acreción, siendo el FMB adicionándosele al lodo aún mejor que el KCl.

- Se realizaron dos pruebas adicionales, las cuales revelaron que el FMB y FMB-Plus son compatibles con aditivos de fluidos de perforación comúnmente utilizados en lodos base agua.
- Debido a que el FMB es una suspensión líquida, se mezcla más rápidamente con el sistema del lodo, sin necesidad de aplicar un alto esfuerzo de corte.
- Debido a que el FMB-Plus es una sustancia de bajo peso molecular (azúcares hidrolizados), permite flexibilidad reológica en un amplio rango de densidades del fluido.
- La mejor forma de conservación del FMB y FMB-Plus se logra refrigerándolo. Si no se cuenta con este mecanismo, la conservación puede ser llevada a cabo mediante la adición de NaOH, llevando el pH de la sustancia a un rango óptimo entre 8,5 a 10. El FMB y el FMB-Plus trabajan muy bien dentro de este rango para lodos que contienen bentonita. Un pH más alto disminuye su efectividad.
- Reemplazar parte del agua del lodo con agua del FMB mostró buena tendencia en las pruebas preliminares, sin embargo este comportamiento cambió bajo condiciones de rolado.
- El desempeño notable del FMB y FMB-Plus en la estabilización de las arcillas, y lutitas sensibles al agua, conlleva a aunar esfuerzos investigativos para desarrollar un nuevo producto biodegradable (FIQUEX) a partir de una planta común, en beneficio de las regiones productoras, como es el caso del departamento de Santander.

## 6. RECOMENDACIONES

- Para todo tipo de experimentos, por muy sencillo que este parezca, siempre será fundamental diseñarlo estadísticamente. El plan de estudios actual de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander, no cuenta con esta asignatura, lo que hace que el estudiante realice todas sus investigaciones bajo ensayos de prueba y error, generando pruebas mal planificadas y por ende con resultados erróneos. Se recomienda implementar la asignatura Diseño de Experimentos para Ingenieros de Petróleos en el plan de estudios.
- Es necesario que este tipo de investigaciones cuenten con el suficiente soporte económico para que el diseño experimental se realice con un mayor número de réplicas, con el fin de reducir tanto los errores de Tipo I como los errores de Tipo II. Es decir, con más réplicas hechas a las pruebas, la potencia de estas será más alta y por tanto el análisis mucho más confiable.
- Realizar análisis químicos que permitan conocer la composición (proporción sales/azúcares) del FMB y FMB-Plus.
- Implementar las pruebas complementarias de dureza, durabilidad y aceptabilidad ambiental para el FMB y FMB-Plus con el fin de ampliar el análisis que requieren los productos estabilizadores, para así conocer el comportamiento en su totalidad.

- Realizar una prueba de transmisión de presión al FMB-Plus (concentraciones > 25% w/w) con el fin de evaluar su comportamiento como viscosificante de bajo peso molecular, es decir, evaluar su efectividad en la reducción de la presión de penetración del lodo en las lutitas consolidadas y no fracturadas.
- Estudiar sistemas combinados KCl/FMB Y KCl/FMB-Plus los cuales sugieren ser más efectivos en la estabilización de lutitas que sus componentes individuales.
- Estudiar sistemas combinados FMB/PHPA (Fluidos de perforación inhibidos convencionales; Tipo II) a fin de estipular su posible aplicación en campo.
- Estudiar sistemas combinados  $\text{CaCl}_2$ /FMB-Plus (Fluidos de perforación osmóticos; Tipo III) a fin de estipular su posible aplicación en campo.
- Estudiar sistemas combinados Silicato/FMB-Plus (Fluidos de perforación de baja o nula invasión; Tipo IV) a fin de estipular su posible aplicación en campo.
- Iniciar investigaciones sobre la utilización de las saponinas (sustancia tenso-activa no iónica; surfactante), presentes en el mucílago de fique como aditivos para mejorar la ROP.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, D.B., and Edwards, C.D.: "Fluid Development for Drilling Sloughing and Heaving Shales," *Petroleum Engineer* (September 1977), 105.
2. Amorocho, R.: *Análisis de la Interacción Química entre los Fluidos de Formación, Fluidos de Perforación y Composición Mineral de Rocas Arcillosas en la Estabilidad de Pozo*, Tesis de Pregrado, Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, 2004.
3. API RECOMMENDED PRACTICE 13B-1: Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, 2<sup>nd</sup> ed. 1997 American Petroleum Institute, Washington.
4. API RECOMMENDED PRACTICE 13I: Standard Procedure for Laboratory Testing Drilling Fluids, 6<sup>th</sup> ed. 2000 American Petroleum Institute, Washington.
5. Aubad, A., García, A., y Zapata, R.: *Hacia la Química 2*, 1<sup>ra</sup> ed. 1985 Editorial Temis, Bogotá.
6. Ballard, T.J., Beare, S.P., and Lawless, T.A.: "Fundamentals of Shale Stabilization: Water Transport through Shales," Paper SPE 24974 presented at the 1992 SPE European Petroleum Conference, Cannes, November 16 - 18.

7. Barboza, J.L., y Sarmiento, J.: Degradación de los Residuos Lignocelulósicos del Cultivo de Fique por Fermentación en Fase Sólida por el Hongo Comestible *Pleurotus Ostreatus*, Tesis de Pregrado, Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander, 2003.
8. Beihoffer, T.W., Dorrough, D.S., and Schmidt D.D.: "The Separation of Electrolyte Effects from Rheological Effects in Studies of Inhibition of Shales with Natural Moisture Contents," Paper SPE 18032 presented at the 63<sup>rd</sup> Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, October 2 - 5.
9. Bland, R., Pessier, F., and Isbell, M.: "Balling in Water-Based Muds," presented at the 2001 AADE National Drilling Conference, Houston, March 27 - 29.
10. Bol, G.M., Wong, S.W., Davidson, C.J., and Woodland, D.C.: "Borehole Stability in Shales," Paper SPE 24975 presented at the 1992 SPE European Petroleum Conference, Cannes, November 16 - 18.
11. Chenevert, M.E.: "Shale Alteration by Water Adsorption," Paper SPE 2401 presented at the 1968 SPE 4<sup>th</sup> Conference on Drilling and Rock Mechanics, Austin, January 14 - 15.
12. Crowe, C.W.: "Laboratory Study Provides Guidelines for Selecting Clay Stabilizers," Paper CIM/SPE 21556 presented at the 1990 CIM/SPE International Technical Meeting, Calgary, June 10 - 13.

13. Delvasto, S., Gutiérrez, R., y López, M.: Aprovechamiento Integral del Fique – Materiales Fibroreforzados y Aditivos, Informe Técnico presentado al Ministerio de Agricultura. 1995 Universidad del Valle, Santiago de Cali.
14. Díaz, A.: Diseño Estadístico de Experimentos, 1<sup>ra</sup> ed. 1999 Universidad de Antioquia, Medellín.
15. Disponible en Internet: [www.edafologia.com](http://www.edafologia.com)
16. Disponible en Internet: [www.glossary.oilfield.slb.com](http://www.glossary.oilfield.slb.com)
17. Disponible en Internet: [www.kingdomdrilling.co.uk](http://www.kingdomdrilling.co.uk)
18. Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2003. Copyright © 1993 – 2002 Microsoft Corporation.
19. FEDEFIQUE, SAC & SINA: Guía Ambiental para el Subsector Fiquero. 2002 Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá.
20. Grim, R.: Applied Clay Mineralogy, 1<sup>st</sup> ed. 1962 McGraw-Hill, New York.
21. Horsrud, P., Bostrom, B., and Holt, R.M.: “Interaction Between Shale and Water-Based Drilling Fluids: Laboratory Exposure Test Give New Insight Into Mechanisms and Field Consequences of KCl Contents,” Paper SPE 48986 presented at the 1998 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, September 27 – 28.

22. IMCO: Tecnología Aplicada de Lodos. Imco Services: Una Compañía Halliburton.
23. KELCO: Manual Técnico. 1992 Kelco Oil Field Group.
24. Kuehl, R.: Diseño de Experimentos, 2<sup>da</sup> ed. 2001 Thomson, México D.F.
25. MILPARK DRILLING FLUIDS: Mudfacts Engineering Handbook. 1990 Milpark: A Baker Hughes Company.
26. Molano, N., y Noguera, R.: Extracción y Caracterización Reológica del Mucílago del Árbol *Heliocarpus Popayanensis* HBK para la Experimentación en Posibles Aplicaciones Industriales, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, 2004.
27. Moreno, O., y Vásquez, W.: Análisis del Lodo Polímero EZ-MUD para Estabilizar Lutitas, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 1989.
28. Moreno, W.: Aplicaciones al Diseño y Análisis de Experimentos, 1<sup>ra</sup> ed. 1993 Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
29. NL Baroid/NL Industries, Inc.: Manual of Drilling Fluids Technology. 1979 NL Industries Inc.
30. O'Brien, D.E., and Chenevert, M.E.: "Stabilizing Sensitive Shales with Inhibited, Potassium-Based Drilling Fluids," Paper SPE 4232 presented at the

1973 SPE-AIME 6<sup>th</sup> Conference on Drilling and Rock Mechanics, Austin, January 22 - 23.

31. Ochoa, C., y Acosta, P.: Estudio de Factibilidad para el Uso del Extracto de Figue como Viscosificante y Controlador de Filtrado, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2002.

32. Patel, A., Stamatakis, E., Young, S., and Cliffe, S.: "Designing for the Future - A Review of the Design, Development and Testing of a Novel, Inhibitive Water-Based Drilling Fluid," presented at the 2002 AADE Technical Conference, Houston, April 2 - 3.

33. -----, -----, Friedheim, J., and Davis, E.: "Highly Inhibitive Water-Based Fluid System Provides Superior Chemical Stabilization of Reactive Shale Formations," presented at the 2001 AADE National Drilling Conference, Houston, March 27 - 29.

34. Pérez, J.: El Figue, su Taxonomía, Cultivo y Tecnología. 2<sup>da</sup> ed. 1974 Colina, Medellín.

35. Pinilla, J.F., y Sepúlveda, R.A.: Evaluación de Productos Estabilizadores de Arcilla para el Campo Casabe, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 1998.

36. Perilla, A.: Tintura del Figue con Colorantes Naturales. PRONATTA - ECO FIBRAS. 2002 Curití.

37. Reid, P.I., and Minton, R.C.: "New Water-Based Muds for Tertiary Shale Control," Paper SPE 23077 presented at the 1991 SPE Offshore Europe Conference, Aberdeen, September 3 - 6.
38. Schlemmer, R., Patel, A., Friedheim, J., Young, S., and Bloys, B.: "Progression of Water-Based Fluids Based on Amine Chemistry - Can the Road Lead to True Oil Mud Replacements?," presented at the 2003 AADE Technical Conference, Houston, April 1 - 3.
39. Shaw, D.: *Introducción a la Química de Superficies y Coloides*, 1<sup>ra</sup> ed. 1970 Alhambra, Madrid.
40. Soric, T., Marinescu, P., and Huelke, R.: "Silicate-Based Drilling Fluids Deliver Optimum Shale Inhibition and Wellbore Stability," Paper SPE/IADC 87133 presented at the 2004 SPE/IADC Drilling Conference, Dallas, March 2 - 4.
41. Stamatakis, E., Thaemlitz, C.J., Coffin, G., and Reid, W.: "A New Generation of Shale Inhibitors for Water-Based Muds," Paper SPE/IADC 29406 presented at the 1995 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, February 28 - March 2.
42. STATGRAPHICS ® PLUS 5.1 para Microsoft ® Windows. Copyright © 1994 - 2000 Statistical Graphics Corp.
43. Temple, C., and Youngson, A.: "Drilling Fluids with Improved Shale Inhibition and Methods of Drilling in Subterranean Formations," US Patent Application 20040204323 (October 14, 2004)

44. van Olphen, H.: *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2<sup>nd</sup> ed. 1977 Wiley-Interscience, New York.

45. van Oort, E.: "A Novel Technique for the Investigation of Drilling Fluid Induced Borehole Instability in Shales," Paper SPE 28064 presented at the 1994 SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference, Delft, August 29 - 31.

46. -----, Hale, A.H., and Mody, F.K.: "Manipulation of Coupled Osmotic Flows for Stabilization of Shales Exposed to Water-Based Drilling Fluids," Paper SPE 30499 presented at the 1995 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, October 22 - 25.

47. -----: "On the Physical and Chemical Stability of Shales," *Journal of Petroleum Science and Engineering* 38 (2003), 213.

48. -----, Hale, A.H., Mody, F.K., and Roy, S.: "Transport in Shales and the Design of Improved Water-Based Shale Drilling Fluids," Paper SPE 28309 presented at the 1994 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, September 25 - 28.

## **ANEXOS**

### **Anexo A. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN DE LOS FILOSILICATOS**

ARREGLO ESTRUCTURAL	GRUPO	SUB-GRUPO	ESPECIE	FORMULA IDEAL	
2:1	Firofilita - Talco	Firofilitas	Firofilita	$Al_2Si_2O_5(OH)_2$	
		Talcos	Talco	$Mg_3Si_2O_5(OH)_2$	
	Montmorillonita - Saponita	Saponitas	Vermiculitas Dioctaédrales Vermiculitas Trioctaédrales	Minerocita	$(Fe, Mg)_3Si_2O_5(OH)_2$
				Montmorillonita	$0.67M^{+}(Al, Li, Na, Mg, Fe, Si)_2O_5(OH)_2$
				Bidilita	$0.67M^{+}Al_2(Si_{1.22}Al_{0.78}O_5(OH)_2)$
				Nontromita	$0.67M^{+}Fe_2(Si_{1.22}Al_{0.78}O_5(OH)_2)$
				Volcanokita	$0.67M^{+}(Fe, Cr, Al)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
				Saponita	$0.67M^{+}Mg_2(Si_{1.22}Al_{0.78}O_5(OH)_2)$
				Sauconita	$0.67M^{+}(Mg, Zn)_2(Si_{1.22}Al_{0.78}O_5(OH)_2)$
				Fectorita	$0.67M^{+}(Mg, Li)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
				Vermiculita dioctaédral	$1.73M^{+}(Al, Fe, etc.)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
				Vermiculita	$1.73M^{+}(Mg, Fe, etc.)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
				Illita	$(K, H_2O)_2(Al, Fe, Mg)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
				Glaucosita	$(K, H_2O)_2(Al, Fe, Mg)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
				Ledikita	$(K, H_2O)_2(Mg, Fe, Al)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$
Mica	Micas Dioctaédrales Micas Trioctaédrales Micas Quebradizas Dioctaédrales Micas Quebradizas Trioctaédrales Cloritas Dioctaédrales Cloritas Trioctaédrales	Moscovita	$K_2Al_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2)$		
Paragonita		$Na_2Al_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2)$			
Flogopita		$K_2Mg_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2)$			
Biotita		$K_2(Mg, Fe, Mn)_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2)$			
Lepidolita		$K_2(Li, Al)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$			
Zinnwaldita		$K_2(Li, Fe, Al)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$			
Margarita		$Ca_2Al_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2)$			
Sibirita		$Ca_2(Mg, Al)_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2)$			
Xantofilita		$Ca_2(Mg, Al)_2(Si_4Al_2O_{10}(OH)_2) \cdot 4H_2O$			
Sudolita		$Al_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$			
-		$(Mg, Fe, etc.)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$			
Dicrita		$Al_2Si_2O_5(OH)_2$			
Nacrita		$Al_2Si_2O_5(OH)_2$			
Caolinita-Tc	$Al_2Si_2O_5(OH)_2$				
Caolinita-Md	$Al_2Si_2O_5(OH)_2$				
Metahalloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_2$				
Halloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_2 \cdot 4H_2O$				
Anaxita	$Al_2Si_2O_5(OH)_2$				
Antigorita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_2$				
Crisolita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_2$				
Amesita	$(Mg, Fe)_2(Al, Si)_2O_5(OH)_2$				
Cronstedtita	$Fe_2(Si_2Fe)_2O_5(OH)_2$				
Bertranda	$(Fe, Mg, Al)_2(Si, Al)_2O_5(OH)_2$				
Palliserita	$(Al, Mg)_2(Si_2O_5(OH)_2) \cdot (H_2O)$				
Sepiolita	$Mg_3Si_2O_5(OH)_2 \cdot (H_2O)$				
Xilebita	$(Mg, Fe)_2(Si_2O_5(OH)_2) \cdot (H_2O)$				
2:1 Bastoncillos	Hormita	Hormitas Mixto dioctaédrales			
		Hormitas Trioctaédrales			

Fuente: Estructura de los Filosilicatos de Arcilla ([www.edafologia.com](http://www.edafologia.com))

**Anexo B. FORMULACIÓN Y ESTUDIO REOLÓGICO DE LOS  
SISTEMAS DE FLUIDO EN LA PRUEBA PRELIMINAR - 1**

**Formulación de los Fluidos (ESTUDIOS REOLÓGICOS)**

LODO BASE			LODO KCl			SISTEMA (#1)		
Agua (ml)	350		Agua (ml)	350		Agua (ml)	350	
Bentonita (g)	10		Bentonita (g)	10		Bentonita (g)	10	
Inhibidor (g)	-		KCl (g)	8		Mucílago (g)	8	
NaOH (g)	0,1		NaOH (g)	0,1		NaOH (g)	0,1	
ATEP* (g)	-		ATEP* (g)	-		ATEP* (g)	-	

SISTEMA (#2)			SISTEMA (#3)			SISTEMA (#4)		
Agua (ml)	350		Agua (ml)	350		Agua (ml)	350	
Bentonita (g)	10		Bentonita (g)	10		Bentonita (g)	10	
M. filtrado (g)	8		Pulpa (g)	8		Pulpa seca (g)	8	
NaOH (g)	0,1		NaOH (g)	0,1		NaOH (g)	0,1	
ATEP* (g)	-		ATEP* (g)	0,5		ATEP* (g)	0,5	

LODO	pH
Base	10
KCl	10
Sistema (#1)	10
Sistema (#2)	10
Sistema (#3)	10
Sistema (#4)	10

\* ATEP: Antiespumante

**Operación inicial:** Agitar los fluidos preparados (30 min. @ T<sub>amb</sub>)

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Sistema (#2)	3,5	2,5	1,0	1,5	8,5	9,5
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	3,0	2,5	0,5	2,0	9,0	9,5
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (#1)	4,0	3,0	1,0	2	8,0	9,0
1	Lodo Base	5,0	3,5	1,5	2,0	9,0	9,0

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
1	Lodo Base	12,0	9,0	3,0	6,0	9,0	9,5
3	Sistema (#1)	12,0	10,0	2,0	8,0	8,5	9,5
2	Lodo KCl	5,0	4,0	1,0	3,0	9,0	9,0
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (#2)	15,0	12,5	2,5	10	8,5	9,0
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	9,0	7,0	2,0	5,0	9,0	9,0
4	Sistema (#2)	51,0	45,0	6,0	39,0	9,0	9,0
1	Lodo Base	25,0	21,0	4,0	17,0	9,0	9,0
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (#1)	48,0	42,0	6,0	36,0	9,0	9,0

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Sistema (#2)	140	130	10	120	8,5	9,5
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	15,0	12,0	3,0	9,0	8,5	9,5
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (#1)	119	117	2,0	115	8,5	9,0
1	Lodo Base	67,0	57,0	10,0	47,0	9,0	9,0

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
2	Lodo KCl	22,0	19,0	3,0	16,0	9,0	9,0
3	Sistema (#1)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (#2)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
3	Sistema (#1)	-	-	-	-	-	-
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	35,0	32,0	3,0	29,0	9,0	9,0
4	Sistema (#2)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	54,0	50,0	4,0	46,0	8,5	9,5
3	Sistema (#1)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (#2)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (#1)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	86,0	83,0	3,0	80,0	9,0	9,0
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
2	Lodo KCl	140	134	6	128	8,5	-
6	Sistema (#4)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (#3)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (#1)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (#2)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
6	Sistema (#4)						
2	Lodo KCl						
4	Sistema (#2)						
1	Lodo Base						
5	Sistema (#3)						
3	Sistema (#1)						

**Anexo C. FORMULACIÓN Y ESTUDIO REOLÓGICO DE LOS  
SISTEMAS DE FLUIDO EN LA PRUEBA PRELIMINAR - 2**

**Formulación de los Fluidos (ESTUDIOS REOLÓGICOS)**

LODO BASE		LODO KCl		SISTEMA (A1)		SISTEMA (A2)		SISTEMA (B1)	
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350
Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10
Inhibidor (g)	-	KCl (g)	8	Mucílago (g)	10	Mucílago (g)	20	M. filtrado (g)	10
NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,15
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	-

SISTEMA (B2)		SISTEMA (B3)		SISTEMA (B4)		SISTEMA (C1)		SISTEMA (C2)	
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	233	Agua (ml)	174
Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10
M. filtrado (g)	20	M. filtrado (g)	30	M. filtrado (g)	40	M. filtrado (g)	117	M. filtrado (g)	176
NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,2	NaOH (g)	0,2
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5

\* ATEP: Antiespumante

LODO	BASE	KCl	(A1)	(A2)	(B1)	(B2)	(B3)	(B4)	(C1)	(C2)
pH	10	10	10	9,5	10	9,5	9,5	9,0	9,0	9,0

**Operación inicial:** Agitar los fluidos preparados (30 min. @ T<sub>amb</sub>)

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Sistema (A2)	8,0	6,0	2,0	4,0	9,0	9,0
8	Sistema (B4)	4,0	2,0	2,0	0	8,0	9,5
9	Sistema (C1)	2,0	1,0	1,0	0	8,0	9,5
6	Sistema (B2)	4,0	2,0	2,0	0	9,0	9,0
3	Sistema (A1)	8,0	4,0	4,0	0	9,5	9,5
1	Lodo Base	5,0	3,5	1,5	2,0	9,0	9,0
10	Sistema (C2)	2,0	1,0	1,0	0	8,0	9,0
5	Sistema (B1)	2,0	1,0	1,0	0	9,5	9,5
2	Lodo KCl	3,0	2,5	0,5	2,0	9,5	9,5
7	Sistema (B3)	2,0	1,0	1,0	0	9,0	9,0

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
1	Lodo Base	12,0	9,0	3,0	6,0	8,5	9,5
3	Sistema (A1)	10,0	6,0	4,0	2,0	9,0	9,0
10	Sistema (C2)	4,0	3,0	1,0	2,0	8,5	9,5
7	Sistema (B3)	7,0	4,0	3,0	1,0	8,5	9,5
9	Sistema (C1)	4,0	3,0	1,0	2,0	9,0	9,0
5	Sistema (B1)	8,0	6,0	2,0	4,0	9,0	9,0
8	Sistema (B4)	5,0	3,0	2,0	1,0	9,0	9,0
2	Lodo KCl	5,0	4,0	1,0	3,0	9,0	9,0
6	Sistema (B2)	7,0	5,0	2,0	3,0	8,5	9,5
4	Sistema (A2)	18,0	13,0	5,0	8,0	8,5	9,5

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
5	Sistema (B1)	22,0	20,0	2,0	18,0	8,5	9,5
9	Sistema (C1)	6,0	4,0	2,0	2,0	8,5	9,5
10	Sistema (C2)	5,0	4,0	1,0	3,0	9,0	9,0
7	Sistema (B3)	13,0	10,0	3,0	7,0	9,0	9,0
4	Sistema (A2)	24,0	19,0	5,0	14,0	9,0	9,0
2	Lodo KCl	9,0	7,0	2,0	5,0	9,0	9,0
1	Lodo Base	25,0	21,0	4,0	17,0	9,5	9,5
6	Sistema (B2)	19,0	16,0	3,0	13,0	9,0	9,0
3	Sistema (A1)	20,0	18,0	2,0	16,0	8,5	9,5
8	Sistema (B4)	9,0	5,0	4,0	1,0	8,5	9,5

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Sistema (A2)	12,0	9,0	3,0	6,0	6,5	9,5
2	Lodo KCl	15,0	12,0	3,0	9,0	8,5	9,5
3	Sistema (A1)	73,0	69,0	4,0	65,0	9,5	9,5
1	Lodo Base	67,0	57,0	10,0	47,0	9,0	9,0
9	Sistema (C1)	7,0	5,0	2,0	3,0	9,0	9,0
8	Sistema (B4)	20,0	16,0	4,0	12,0	9,0	9,0
10	Sistema (C2)	6,0	5,0	1,0	4,0	8,5	10
6	Sistema (B2)	57,0	55,0	2,0	53,0	9,0	9,0
5	Sistema (B1)	59,0	56,0	3,0	53,0	9,5	9,5
7	Sistema (B3)	30,0	26,0	4,0	22,0	8,5	9,5

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
8	Sistema (B4)	65,0	64,0	1,0	63,0	8,5	9,5
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (B1)	185	182	3,0	179	9,0	-
7	Sistema (B3)	91,0	89,0	2,0	87,0	9,0	9,0
9	Sistema (C1)	10,0	7,0	3,0	4,0	8,5	9,5
2	Lodo KCl	22,0	19,0	3,0	16,0	9,0	9,0
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
6	Sistema (B2)	170	167	3,0	164	8,5	-
10	Sistema (C2)	8,0	6,0	2,0	4,0	9,0	9,0
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
2	Lodo KCl	35,0	32,0	3,0	29,0	9,0	9,0
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
8	Sistema (B4)	190	189	1,0	188	9,5	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	22,0	15,0	7,0	8,0	9,0	9,0
10	Sistema (C2)	11,0	8,0	3,0	5,0	8,5	9,5
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
8	Sistema (B4)	-	-	-	-	-	-
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	30,0	21,0	9,0	12,0	8,5	9,5
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	54,0	50,0	4,0	46,0	8,5	9,5
10	Sistema (C2)	21,0	14,0	7,0	7,0	9,0	9,0
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
8	Sistema (B4)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	86,0	83,0	3,0	80,0	9,0	9,0
10	Sistema (C2)	29,0	21,0	8,0	13,0	8,5	9,5
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	32,0	26,0	6,0	20,0	9,0	9,0
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
8	Sistema (B4)	-	-	-	-	-	-
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	46,0	39,0	7,0	32,0	8,5	9,5
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
10	Sistema (C2)	46,0	32,0	14,0	18,0	9,0	9,0
2	Lodo KCl	140	134	6,0	128	8,5	9,5

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-
10	Sistema (C2)	50,0	38,0	12,0	26,0	8,5	9,5
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
8	Sistema (B4)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	85,0	71,0	14,0	57,0	9,0	9,0
2	Lodo KCl	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
8	Sistema (B4)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	160	145	15,0	130	8,5	9,5
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
10	Sistema (C2)	72,0	60,0	12,0	48,0	9,0	9,0
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
6	Sistema (B2)	-	-	-	-	-	-
8	Sistema (B4)	-	-	-	-	-	-
3	Sistema (A1)	-	-	-	-	-	-
10	Sistema (C2)	110	93	17,0	76,0	8,5	9,5
7	Sistema (B3)	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
5	Sistema (B1)	-	-	-	-	-	-
4	Sistema (A2)	-	-	-	-	-	-
9	Sistema (C1)	-	-	-	-	-	-

**Anexo D. FORMULACIÓN Y ESTUDIO REOLÓGICO DE LOS  
SISTEMAS DE FLUIDO EN LA PRUEBA FINAL BTT - 1**

**Formulación de los Fluidos (ESTUDIOS REOLÓGICOS)**

LODO BASE (LB)		LODO KCl		LODO BASE + FMB (#1)		LODO BASE + FMB (#2)		LODO	pH
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	BASE	10
Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	KCl	10
Inhibidor (g)	-	KCl (g)	8	FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB#1	9,5
NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,2	NaOH (g)	0,25	FMB#2	9,5
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	FMB#3	9
FMB (#3)		FMB (#4)		FMB (#5)		LODO BASE + FMB (#6)		FMB#4	8,5
Agua (ml)	280	Agua (ml)	270	Agua (ml)	230	Agua (ml)	350	FMB#5	8,5
Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	FMB#6	8,5
FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB (g)	120	FMB-Plus (g)	8		
NaOH (g)	0,2	NaOH (g)	0,25	NaOH (g)	0,25	NaOH (g)	0,25		
ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5		

\* ATEP: Antiespumante

**Operación inicial:** Rolar los fluidos preparados (16 horas @ 150°F)

19 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Ø <sub>600</sub>	Ø <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Lodo FMB #2	3,5	2,0	1,5	0,5	6	9,5
5	Lodo FMB #3	4,0	2,0	2,0	0	6,5	9,5
2	Lodo KCl	5,5	3,5	2,5	1,0	8,5	9,5
7	Lodo FMB #5	4,5	2,5	2,0	0,5	5,5	9,0
8	Lodo FMB #6	4,5	2,5	2,0	0,5	6,5	9,0
6	Lodo FMB #4	4,5	2,5	2,0	0,5	6,5	9,0
3	Lodo FMB #1	4,0	2,0	2,0	0	6,5	8,5
1	Lodo Base	15,0	9,5	5,5	4,0	9,0	9,0

20 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Ø <sub>600</sub>	Ø <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
1	Lodo Base	38,0	25,0	13,0	12,0	8,5	9,5
3	Lodo FMB #1	5,0	2,5	2,5	0	6,5	9,5
2	Lodo KCl	7,0	5,0	2,0	3,0	8,0	9,0
6	Lodo FMB #4	5,5	3,5	2,0	1,5	5,5	9,5
4	Lodo FMB #2	4,5	2,5	2,0	0,5	6,0	9,5
5	Lodo FMB #3	5,5	3,0	2,5	0,5	6,0	9,5
8	Lodo FMB #6	6,0	3,0	3,0	0	7,0	9,0
7	Lodo FMB #5	5,0	3,0	2,0	1,0	5,5	9,5

21 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Ø <sub>600</sub>	Ø <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
7	Lodo FMB #5	7,5	4,0	3,5	0,5	7,0	9,0
6	Lodo FMB #4	8,0	4,5	3,5	1,0	6,5	9,5
8	Lodo FMB #6	8,0	4,5	3,5	1,0	7,0	9,5
2	Lodo KCl	9,5	7,0	2,5	4,5	8,5	9,5
4	Lodo FMB #2	7,5	4,0	3,5	0,5	7,5	9,5
1	Lodo Base	170	150	20,0	130	8,5	9,5
5	Lodo FMB #3	9,0	5,0	4,0	1,0	6,5	9,5
3	Lodo FMB #1	8,5	4,5	4,0	0,5	7,0	9,5

22 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
  - 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Ø <sub>600</sub>	Ø <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
8	Lodo FMB #6	14,0	9,0	5,0	4,0	8,0	9,5
2	Lodo KCl	13,0	9,0	4,0	5,0	8,0	9,5
7	Lodo FMB #5	12,0	7,0	5,0	2,0	7,0	9,5
6	Lodo FMB #4	15,0	9,0	6,0	3,0	7,5	9,5
1	Lodo Base	316	304	12,0	292	8,5	-
5	Lodo FMB #3	16,0	9,5	6,5	3,0	7,5	9,5
3	Lodo FMB #1	14,0	8,0	6,0	2,0	7,5	9,5
4	Lodo FMB #2	13,0	8,0	5,0	3,0	7,0	9,5

23 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
2	Lodo KCl	26,0	22,0	4,0	18,0	8,0	9,5
3	Lodo FMB #1	43,0	33,0	11,0	21,0	8,0	9,5
7	Lodo FMB #5	58,0	46,0	12,0	34,0	7,5	9,5
5	Lodo FMB #3	82,0	74,0	9,0	65,0	8,0	9,5
4	Lodo FMB #2	36,0	25,0	11,0	14,0	7,5	9,5
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
6	Lodo FMB #4	54,0	44,0	11,0	33,0	8,0	9,5
8	Lodo FMB #6	32,5	23,0	10,0	13,0	7,5	9,5

24 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
3	Lodo FMB #1	245	210	35,0	175	8,0	-
6	Lodo FMB #4	290	255	35,0	220	8,0	-
2	Lodo KCl	55,0	54,0	1,0	53,0	8,0	9,5
4	Lodo FMB #2	200	180	25,0	150	7,5	-
7	Lodo FMB #5	300	269	31,0	238	7,5	-
8	Lodo FMB #6	134	118	20,0	90,0	7,5	9,0
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
5	Lodo FMB #3	320	286	34,0	252,0	8,0	-

25 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
6	Lodo FMB #4	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	110	105	5,0	100	8,0	9,5
3	Lodo FMB #1	-	-	-	-	-	-
8	Lodo FMB #6	215	190	25,0	165	7,0	9,5
5	Lodo FMB #3	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
4	Lodo FMB #2	-	-	-	-	-	-

26 | 04 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Lodo FMB #2	-	-	-	-	-	-
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
3	Lodo FMB #1	-	-	-	-	-	-
5	Lodo FMB #3	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	155	150	5,0	145	8,0	-
6	Lodo FMB #4	-	-	-	-	-	-

DÍA | MES | AÑO

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
2	Lodo KCl						
6	Lodo FMB #4						
1	Lodo Base						
5	Lodo FMB #3						
3	Lodo FMB #1						
8	Lodo FMB #6						
4	Lodo FMB #2						
7	Lodo FMB #5						

DÍA | MES | AÑO

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10 g.)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
7	Lodo FMB #5						
6	Lodo FMB #4						
8	Lodo FMB #6						
2	Lodo KCl						
4	Lodo FMB #2						
1	Lodo Base						
5	Lodo FMB #3						
3	Lodo FMB #1						

**Anexo E. FORMULACIÓN Y ESTUDIO REOLÓGICO DE LOS  
SISTEMAS DE FLUIDO EN LA PRUEBA FINAL BTT - 2**

**Formulación de los Fluidos (ESTUDIOS REOLÓGICOS)**

LODO BASE (LB)		LODO BASE + KCl		LODO BASE + FMB (#1)		LODO BASE + FMB (#2)		LODO	pH
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	BASE	12
Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	KCl	12
Inhibidor (g)	-	KCl (g)	8	FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB#1	11,5
NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	FMB#2	11
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	FMB#3	11,5

FMB (#3)		FMB (#4)		FMB (#5)		LODO BASE + FMB (#6)	
Agua (ml)	280	Agua (ml)	270	Agua (ml)	-	Agua (ml)	-
Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	10	Bentonita (g)	-	Bentonita (g)	-
FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB (g)	-	FMB-Plus (g)	-
NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	-	NaOH (g)	-
ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-

\* ATEP: Antiespumante

**Operación inicial:** Rolar los fluidos preparados (16 horas @ 150°F)

11 | 05 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10. g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
4	Lodo FMB #2	5,0	3,0	2,0	1,0	8,5	11
5	Lodo FMB #3	6,0	4,0	2,0	2,0	9	11
2	Lodo KCl	5,0	2,5	2,5	0	10,5	11,5
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-
6	Lodo FMB #4	5,0	3,0	2,0	1,0	9	11
3	Lodo FMB #1	5,0	3,0	2,0	1,0	9	11
1	Lodo Base	9,0	5,0	4,0	1,0	11	12

12 | 05 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10. g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
1	Lodo Base	19,0	12,0	7,0	5,0	10,5	12
3	Lodo FMB #1	13,0	8,0	5,0	3,0	8,5	11
2	Lodo KCl	11,0	8,0	3,0	5,0	10	12
6	Lodo FMB #4	17,0	11,0	6,0	5,0	9	11
4	Lodo FMB #2	13,0	8,0	5,0	3,0	8,5	11
5	Lodo FMB #3	18,0	11,5	6,5	5,0	8,5	11
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-

13 | 05 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10. g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
6	Lodo FMB #4	46,0	40,0	6,0	34,0	8,5	11
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	15,0	11,0	4,0	7,0	10	11
4	Lodo FMB #2	30,0	23,0	7,0	16,0	8,5	11
1	Lodo Base	90,0	75,0	15,0	60,0	10,5	11
5	Lodo FMB #3	35,0	26,0	9,0	17,0	8,5	11
3	Lodo FMB #1	34,0	28,0	6,0	22,0	8,5	11

14 | 05 | 2005

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10. g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	Θ <sub>600</sub>	Θ <sub>300</sub>	V <sub>D</sub>	Y <sub>D</sub>	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	31,0	25,0	6,0	19,0	10	11
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
6	Lodo FMB #4	188	177	11,0	166	9	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
5	Lodo FMB #3	162	152	10,0	142	9	-
3	Lodo FMB #1	127	122	5,0	117	8,5	-
4	Lodo FMB #2	145	130	15,0	115	9	-

15	05	2005
----	----	------

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10.g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	$pH_i$	$pH_f$
2	Lodo KCl	44,5	42,0	2,5	39,5	9,5	11
3	Lodo FMB #1	-	-	-	-	-	-
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
5	Lodo FMB #3	-	-	-	-	-	-
4	Lodo FMB #2	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
6	Lodo FMB #4	-	-	-	-	-	-
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-

16	05	2005
----	----	------

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10.g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	$pH_i$	$pH_f$
3	Lodo FMB #1	-	-	-	-	-	-
6	Lodo FMB #4	-	-	-	-	-	-
2	Lodo KCl	77,0	72,0	5,0	67,0	10	-
4	Lodo FMB #2	-	-	-	-	-	-
7	Lodo FMB #5	-	-	-	-	-	-
8	Lodo FMB #6	-	-	-	-	-	-
1	Lodo Base	-	-	-	-	-	-
5	Lodo FMB #3	-	-	-	-	-	-

DÍA	MES	AÑO
-----	-----	-----

**Operaciones:**

1. Reología y medición de pH
2. Adicionar bentonita (10.g)
- 2.1. Agitación (30 min.)
3. Ajustar pH @ 9,5
4. Rolar (16 hrs. @ 150°F)

Tratamiento	Tipo de Lodo	$\Theta_{600}$	$\Theta_{300}$	$V_D$	$Y_D$	$pH_i$	$pH_f$
6	Lodo FMB #4						
2	Lodo KCl						
3	Lodo FMB #1						
8	Lodo FMB #6						
5	Lodo FMB #3						
1	Lodo Base						
7	Lodo FMB #5						
4	Lodo FMB #2						

**Anexo F. FORMULACIÓN Y ESTUDIO DE FILTRADO API DE LOS  
SISTEMAS DE FLUIDO EN LA PRUEBA FINAL BTT**



UIS - Ing. de Petróleos  
ICP - Ecopetrol S.A.

Reporte de Lodo Base Agua  
Abril 26 - 2005  
Prueba de Tolerancia a la Bentonita

**Formulación de los Fluidos (ESTUDIOS DE FILTRADO API)**

LODO BASE (LB)		LODO BASE + KCl		LODO BASE + FMB (#1)		LODO BASE + FMB (#2)		LODO	pH
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	BASE	9,5
Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	KCl	10
Inhibidor (g)	-	KCl (g)	8	FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB#1	10
NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,17	NaOH (g)	0,18	FMB#2	10
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	FMB#3	10
FMB (#3)		FMB (#4)		FMB (#5)		LODO BASE + FMB (#6)		FMB#4	9,5
Agua (ml)	280	Agua (ml)	270	Agua (ml)	230	Agua (ml)	350	FMB#5	9,5
Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	FMB#6	9,0
FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB (g)	120	FMB-Plus (g)	8		
NaOH (g)	0,16	NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,2	NaOH (g)	0,14		
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,4		

\* ATEP: Antiespumante

**Operación inicial:** Rolar los fluidos preparados (16 horas @ 150°F)

PRUEBA No. 1

27 04 2005

**Operaciones:**

1. Medir pérdida de filtrado (30 min. @ 100 psi)

Tipo de Lodo	Perdida de Filtrado (ml)
Lodo Base	14,0
Lodo KCl	70,0
Lodo FMB #1	30,0
Lodo FMB #2	33,0
Lodo FMB #3	24,0
Lodo FMB #4	24,0
Lodo FMB #5	34,0
Lodo FMB #6	42,0



UIS - Ing. de Petróleos  
ICP - Ecopetrol S.A.

Reporte de Lodo Base Agua  
Mayo 16 - 2005  
Prueba de Tolerancia a la Bentonita

**Formulación de los Fluidos (ESTUDIOS DE FILTRADO API)**

LODO BASE (LB)		LODO BASE + KCl		LODO BASE + FMB (#1)		LODO BASE + FMB (#2)		LODO	pH
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	BASE	9,5
Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	KCl	10
Inhibidor (g)	-	KCl (g)	8	FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB#1	10
NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,1	NaOH (g)	0,17	NaOH (g)	0,18	FMB#2	10
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	FMB#3	10
FMB (#3)		FMB (#4)		FMB (#5)		LODO BASE + FMB (#6)		FMB#4	9,5
Agua (ml)	280	Agua (ml)	270	Agua (ml)	230	Agua (ml)	350	FMB#5	9,5
Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	Bentonita (g)	50	FMB#6	9,0
FMB (g)	70	FMB (g)	80	FMB (g)	120	FMB-Plus (g)	8		
NaOH (g)	0,16	NaOH (g)	0,15	NaOH (g)	0,2	NaOH (g)	0,2		
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-		

\* ATEP: Antiespumante

**Operación inicial:** Rolar los fluidos preparados (16 horas @ 150°F)

PRUEBA No. 2

17 05 2005

**Operaciones:**

1. Medir pérdida de filtrado (30 min. @ 100 psi)

Tipo de Lodo	Perdida de Filtrado (ml)
Lodo Base	13,9
Lodo KCl	71,0
Lodo FMB #1	31,0
Lodo FMB #2	34,0
Lodo FMB #3	25,0
Lodo FMB #4	27,0
Lodo FMB #5	34,0
Lodo FMB #6	40,0

**Anexo G. FORMULACIONES Y RESULTADOS DE LA PRUEBA DE  
DISPERSIÓN**

**Formulación de los Fluidos**

LODO KCl (5% w/w)		L. INHIBIDO FMB #1		L. INHIBIDO FMB #2		L. INHIBIDO FMB #3		L. INHIBIDO FMB #4	
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	270	Agua (ml)	350	Agua (ml)	230
KCl (g)	18,09	FMB (g)	80	FMB (g)	80	FMB-Plus** (g)	18,09	FMB (g)	120
NaOH (g)	0,05	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4
Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5
PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0
XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0

 \* ATEP: Antiespumante  $[Al(C_{18}H_{36}O_2)_2]$ 

 \*\* FMB deshidratado  
 pH 10 máximo

REOLOGÍA	LODO KCl (5% w/w)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
600 rpm	36	40	56	26	54
300 rpm	25	27	39	16	37
200 rpm	20	21	31	12	30
100 rpm	13,5	14	21	8	20,5
6 rpm	3	2	4	1	4,5
3 rpm	2	1	2,5	0,5	3
Gel 10-seg (lb/100 ft <sup>2</sup> )	3	1	3	1	2
Gel 10-min (lb/100 ft <sup>2</sup> )	8	3	7	6	7
pH	10	9	9	9	9
Densidad (lpg)	8,75	8,5	8,4	8,6	8,5
V <sub>a</sub> (cP)	18	20	28	13	27
V <sub>p</sub> (cP)	11	13	17	10	17
Y <sub>p</sub> (lb/100 ft <sup>2</sup> )	14	14	22	6	20

Mayo 5 - 2005	AGUA	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
W rípios (malla 6/12), gr.	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
W tamiz 12, gr.	83,71	83,71	83,71	83,71	83,71	83,71
W tamiz 12 + rípios, gr.	89,4	101,83	98,74	98,62	100,25	95,7
W tamiz 80, gr.	119,84	119,84	119,84	119,84	119,84	119,84
W tamiz 80 + rípios, gr.	121,5	119,98	120,68	120,84	120,37	121,0

**RESULTADOS**

	AGUA	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
% Retenido en malla 12	28,45%	90,6%	75,15%	74,55%	82,7%	59,95%
% Retenido en malla 80	8,3%	0,7%	4,2%	5,0%	2,65%	5,8%
<b>% Dispersión</b>	<b>63,25%</b>	<b>8,7%</b>	<b>20,65%</b>	<b>20,45%</b>	<b>14,65%</b>	<b>34,25%</b>

Observaciones:

Rípios de lutitas de la formación Mito fueron usados en esta prueba.

Nota:

El % de dispersión es la cantidad de rípios que pasan a través de la malla 80.

**Formulación de los Fluidos**

LODO KCl (5% w/w)			L. INHIBIDO FMB #1		L. INHIBIDO FMB #2		L. INHIBIDO FMB #3		L. INHIBIDO FMB #4	
Agua (ml)	350		Agua (ml)	350	Agua (ml)	270	Agua (ml)	-	Agua (ml)	-
KCl (g)	18,09		FMB (g)	80	FMB (g)	80	FMB-Plus** (g)	-	FMB (g)	-
NaOH (g)	0,05		NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	-	NaOH (g)	-
Bentonita (g)	6,0		Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	-	Bentonita (g)	-
ATEP* (g)	-		ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-
PAC (g)	1,0		PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	-	PAC (g)	-
XC-Polímero (g)	1,0		XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	-	XC-Polímero (g)	-

 \* ATEP: Antiespumante  $[Al(C_{18}H_{36}O_2)_2]$ 

 \*\* FMB deshidratado  
 pH 10 máximo

REOLOGÍA	LODO KCl (5% w/w)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
600 rpm	39	36	56	-	-
300 rpm	26	24	40	-	-
200 rpm	20	19	32	-	-
100 rpm	13	12	22	-	-
6 rpm	2,5	1,5	4	-	-
3 rpm	1,5	1	3	-	-
Gel 10-seg (lb/100 ft <sup>2</sup> )	2,5	1	3	-	-
Gel 10-min (lb/100 ft <sup>2</sup> )	8	3	7	-	-
pH	10	9	9,5	-	-
Densidad (lb/g)	8,8	8,5	8,2	-	-
V <sub>a</sub> (cP)	19,5	18	28	-	-
V <sub>p</sub> (cP)	13	12	16	-	-
V <sub>p</sub> (lb/100 ft <sup>2</sup> )	13	12	24	-	-

Mayo 6 - 2005	AGUA	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
W ripios (malla 6/12), gr.	20,0	20,0	20,0	20,0	-	-
W tamiz 12, gr.	83,71	83,71	83,71	83,71	-	-
W tamiz 12 + ripios, gr.	89,43	101,19	98,49	98,21	-	-
W tamiz 80, gr.	119,84	119,84	119,84	119,84	-	-
W tamiz 80 + ripios, gr.	121,57	119,97	120,57	120,78	-	-

**RESULTADOS**

	AGUA	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
% Retenido en malla 12	28,6%	90,95%	73,9%	72,5%	-	-
% Retenido en malla 80	8,65%	0,65%	3,65%	4,7%	-	-
<b>% Dispersión</b>	<b>62,75%</b>	<b>8,4%</b>	<b>22,45%</b>	<b>22,8%</b>	-	-

 Observaciones:  
 Nota:

 Ripios de lutitas de la formación Mito fueron usados en esta prueba.  
 El % de dispersión es la cantidad de ripios que pasan a través de la malla 80.



UIS - Ing. de Petróleos  
ICP - Ecopetrol S.A.

Reporte de Lodo Base Agua  
Mayo 10 - 2005  
Prueba 3 de Dispersión

#### Formulación de los Fluidos

LODO KCl (5% w/w)		L. INHIBIDO FMB #1		L. INHIBIDO FMB #2		L. INHIBIDO FMB #3		L. INHIBIDO FMB #4	
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	270	Agua (ml)	-	Agua (ml)	-
KCl (g)	18,09	FMB (g)	80	FMB (g)	80	FMB-Plus** (g)	-	FMB (g)	-
NaOH (g)	0,05	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	0,4	NaOH (g)	-	NaOH (g)	-
Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	6,0	Bentonita (g)	-	Bentonita (g)	-
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-
PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	-	PAC (g)	-
XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	1,0	XC-Polímero (g)	-	XC-Polímero (g)	-

\* ATEP: Antiespumante [Al(C<sub>18</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>)<sub>3</sub>]

\*\* FMB deshidratado  
pH 10 máximo

REOLOGÍA	LODO KCl (5% w/w)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
600 rpm	37	39	56	-	-
300 rpm	25	27	39	-	-
200 rpm	20	21	32	-	-
100 rpm	13	14	21	-	-
6 rpm	3	2	4	-	-
3 rpm	2	1	2,5	-	-
Gel 10-seg (lb/100 ft <sup>2</sup> )	3	1,5	3	-	-
Gel 10-min (lb/100 ft <sup>2</sup> )	8	3	7	-	-
pH	10	9	9,5	-	-
Densidad (lpg)	8,8	8,35	8,3	-	-
V <sub>a</sub> (cP)	18,5	19,5	28	-	-
V <sub>p</sub> (cP)	12	12	17	-	-
Y <sub>p</sub> (lb/100 ft <sup>2</sup> )	13	15	22	-	-

Mayo 11 - 2005	AGUA	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
W ripios (malla 6/12), gr.	20,00	20,00	20,00	20,00	-	-
W tamiz 12, gr.	83,71	83,71	83,71	83,71	-	-
W tamiz 12 + ripios, gr.	89,22	101,89	98,73	98,92	-	-
W tamiz 80, gr.	119,84	119,84	119,84	119,84	-	-
W tamiz 80 + ripios, gr.	121,58	119,97	120,78	120,7	-	-

#### RESULTADOS

	AGUA	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3	L.I. FMB #4
% Retenido en malla 12	27,55%	90,9%	75,1%	76,05%	-	-
% Retenido en malla 80	8,7%	0,65%	4,7%	4,3%	-	-
<b>% Dispersión</b>	<b>63,75%</b>	<b>8,45%</b>	<b>20,2%</b>	<b>19,65%</b>	-	-

Observaciones:

Ripios de lutitas de la formación Mito fueron usados en esta prueba.

Nota:

El % de dispersión es la cantidad de ripios que pasan a través de la malla 80.

**Anexo H. FORMULACIÓN Y REOLOGÍA DEL LODO BASE A  
DIFERENTES CONCENTRACIONES DE POLÍMERO**

<b>COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA</b>		<b>Fluido 1</b>	<b>Fluido 2</b>
Agua	(ml)	350	350
Bentonita	(g)	10	10
XC-Polímero	(g)	0,5	1,0
Pac	(g)	1,0	1,0
NaOH	(g)	0,6	0,7
<b>REOLOGÍA</b>			
600 rpm		42	71
300 rpm		29	52
200 rpm		24	42
100 rpm		16	36,5
6 rpm		3,5	8
3 rpm		2,5	6
Gel 10-seg	(lb/100 ft <sup>2</sup> )	2,5	7
Gel 10-min	(lb/100 ft <sup>2</sup> )	6	17
pH		9,5	9,5
Densidad	(lpg)	8,55	8,4
V <sub>a</sub>	(cP)	21	35,5
V <sub>p</sub>	(cP)	13	19
Y <sub>p</sub>	(lb/100 ft <sup>2</sup> )	16	33

**Anexo I. FORMULACIONES Y RESULTADOS DE LA PRUEBA DE  
ACRECIÓN**

**Formulación de los Fluidos**

LODO BASE		LODO KCl (5% w/w)		L. INHIBIDO FMB #1		L. INHIBIDO FMB #2		L. INHIBIDO FMB #3	
Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	350	Agua (ml)	270	Agua (ml)	350
Inhibidor (g)	-	KCl (g)	18,09	FMB (g)	80	FMB (g)	80	FMB-Plus** (g)	18,09
NaOH (g)	0,06	NaOH (g)	0,07	NaOH (g)	0,48	NaOH (g)	0,40	NaOH (g)	0,25
Bentonita (g)	10,0	Bentonita (g)	10,0	Bentonita (g)	10,0	Bentonita (g)	10,0	Bentonita (g)	10,0
ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	-	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5	ATEP* (g)	0,5
PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0	PAC (g)	1,0
XC-Polímero (g)	0,5	XC-Polímero (g)	0,5	XC-Polímero (g)	0,5	XC-Polímero (g)	0,5	XC-Polímero (g)	0,5

 \* ATEP: Antiespumante [Al(C<sub>18</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>)<sub>3</sub>]

 \*\* FMB deshidratado  
 pH 10 máximo

Mayo 17 y 18 - 2005

REOLOGÍA	LODO BASE	LODO KCl (5% w/w)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3
600 rpm	42	23	40	43	27
300 rpm	29	15	26	30	17
200 rpm	24	11,5	20	24	13
100 rpm	16	7,5	13,5	16	8
6 rpm	3,5	2	3	3,5	1
3 rpm	2,5	1	2	2,5	0,5
Gel 10-seg (lb/100 ft <sup>2</sup> )	2,5	2	3	3,5	1
Gel 10-min (lb/100 ft <sup>2</sup> )	6	5	10	15	6
pH	9,5	10	9	8,5	9,5
Densidad (lpg)	8,55	8,75	8,3	8	8,1
V <sub>a</sub> (cP)	21	11,5	20	21,5	13,5
V <sub>p</sub> (cP)	13	8	14	13	10
Y <sub>p</sub> (lb/100 ft <sup>2</sup> )	16	7	16	17	7

Mayo 17 y 18 - 2005

	LODO BASE	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3
W rípios (malla 6/12), gr.	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
W barra, gr.	342,32	341,98	342,01	342,02	342,41
W barra + rípios, gr.	355,69	343,53	342,7	344,75	344,06

**RESULTADOS**

	LODO BASE	LODO KCl (5%)	L.I. FMB #1	L.I. FMB #2	L.I. FMB #3
Cantidad adherida a la barra, %	<u>33,425%</u>	<u>3,875%</u>	<u>1,725%</u>	<u>6,825%</u>	<u>4,125%</u>

 Observaciones:  
 Nota:

 Rípios de lutitas de la formación Carbonera del piedemonte llanero fueron usados en esta prueba.  
 El % de acreción es la cantidad de rípios que se adhieren a la barra luego del secado.

**Anexo J. FORMULACIÓN Y REOLOGÍA DE LOS SISTEMAS DE FLUIDO  
PARA LA PRUEBA DE COMPATIBILIDAD**



UIS - Ing. de Petróleos  
ICP - Ecopetrol S.A.

Reporte de Lodo Base Agua  
Mayo 19 - 2005  
Prueba de Compatibilidad

**Formulación de los Fluidos**

LODO BASE			LODO KCl (5% w/w)			L. INHIBIDO FMB #1		L. INHIBIDO FMB #3			
Agua	(ml)	350	Agua	(ml)	350	Agua	(ml)	350	Agua	(ml)	350
Inhibidor	(g)	-	KCl	(g)	18,09	FMB	(g)	80	FMB-Plus**	(g)	18,09
NaOH	(g)	0,06	NaOH	(g)	0,07	NaOH	(g)	0,48	NaOH	(g)	0,25
Bentonita	(g)	10,0	Bentonita	(g)	10,0	Bentonita	(g)	10,0	Bentonita	(g)	10,0
ATEP*	(g)	-	ATEP*	(g)	-	ATEP*	(g)	0,5	ATEP*	(g)	0,5
PAC	(g)	1,0	PAC	(g)	1,0	PAC	(g)	1,0	PAC	(g)	1,0
XC-Polímero	(g)	0,5	XC-Polímero	(g)	0,5	XC-Polímero	(g)	0,5	XC-Polímero	(g)	0,5

\* ATEP: Antiespumante  $[Al(C_{18}H_{36}O_2)_3]$

\*\* FMB deshidratado  
pH 10 máximo

Mayo 19 y 20 - 2005

REOLOGÍA @ 120°F	LODO BASE		LODO KCl		L.I. FMB #1		L.I. FMB #3	
Antes y Después del Rolado	AR	DR	AR	DR	AR	DR	AR	DR
600 rpm	40,5	44	28	31	38	42	26	29
300 rpm	28,5	30	18	19	25	27	15	18
200 rpm	23	24	14	22	19	22	11	15
100 rpm	16	16	9,5	15	13	15	7	10
6 rpm	3,5	3	3	2,5	2	2,5	1	2
3 rpm	2,5	2	2,5	1,5	1	1,5	0,5	1,5
Gel 10-seg (lb/100 ft <sup>2</sup> )	2,5	2,5	4,5	2	2,5	2	2	3
Gel 10-min (lb/100 ft <sup>2</sup> )	8	7,5	15	9,5	9	9,5	6	5
V <sub>a</sub> (cP)	20,25	22	14	15,5	19	21	13	14,5
V <sub>p</sub> (cP)	12	14	10	12	13	15	11	11
Y <sub>p</sub> (lb/100 ft <sup>2</sup> )	16,5	16	8	7	12	12	7	7