

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MINERAL BARITA DE LA SIERRA
NEVADA DE SANTA MARTA COMO DENSIFICANTE PARA LA
IMPLEMENTACIÓN EN UN FLUIDO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A NIVEL
DE LABORATORIO

DANIELA AMAYA CORTES
FRANCISCO JAVIER GUTIERREZ SANCHEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2020

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MINERAL BARITA DE LA SIERRA
NEVADA DE SANTA MARTA COMO DENSIFICANTE PARA LA
IMPLEMENTACIÓN EN UN FLUIDO DE PERFORACIÓN BASE AGUA A NIVEL
DE LABORATORIO

DANIELA AMAYA CORTES
FRANCISCO JAVIER GUTIERREZ SANCHEZ

Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:
JOHN F. CERÓN
Ing. Civil, Geólogo PhD.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

Bogotá, D.C. Octubre de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD AMÉRICA

Presidente de la universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLES

Vicerrector Administrativo Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa Ingeniería de Petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRIGUEZ ESPARZA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado a mi familia por su amor incondicional y apoyo a toda hora, el mérito de este logro en mi vida es para ellos. Lo dedico a Dios por cuidar mi camino y dirigirme hasta acá. A la Fundación Universidad de América por infundir tantos valores y conocimiento lo cual será de utilidad en mi vida personal y laboral.

Daniela Amaya Cortes

Este trabajo de grado lo dedico a mi núcleo familiar, mi madre María, mi padre Fernando y mi hermana Ashly porque gracias a ellos, su compañía constante, su amor y su apoyo incondicional, he culminado una etapa importante en mi vida.

Francisco Javier Gutiérrez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

Sincero agradecimiento por parte de los autores de este proyecto de grado a todos los que brindaron su colaboración, apoyo y su tiempo durante la elaboración, revisión y culminación de este trabajo:

Principalmente a Dios por cuidar e iluminar nuestro camino a lo largo de la carrera universitaria y permitirnos terminar con éxito esta gran etapa de nuestras vidas.

A la Fundación Universidad de América por aportar conocimiento junto a un inigualable grupo de docentes que nos acompañaron, guiaron y brindaron apoyo a lo largo de 5 años de carrera.

Al geólogo y director de la tesis John Cerón por su acompañamiento, apoyo y orientación a lo largo de este proyecto de grado

Al Ingeniero de minas Álvaro Oñate por su ayuda y asesoría en cada uno de los puntos de este trabajo de grado, por brindarnos su mano para ser parte de una cultura nueva.

Docente e ingeniero Nelson Fernández por su paciencia, por brindarnos su tiempo y su apoyo incondicional, además de su total interés en nuestro aprendizaje. Sus consejos y amor a su trabajo nos catapultaron a la culminación de este proyecto de grado.

Docente e ingeniero Jorge Tovar por sus consejos, tiempo y dedicación a la revisión de este proyecto de grado.

Principalmente a Dios por iluminar y guiar mi camino en la vida. A mi madre, Sandra Yovanna Cortés, mi tía, Melannie Cortes y mis abuelos, por ser mi mayor ejemplo de constancia y del amor incondicional, por ser mi apoyo en cada decisión que he tomado, por cada consejo que me han dado. A todas las personas que hicieron parte de mi vida universitaria, María Camila, María José y Mariana mis amigas de la universidad quienes me han acompañado a lo largo de este proceso, por ser mí apoyo en cada una de las etapas de la carrera. A mi compañero Francisco Gutiérrez por su paciencia y entrega total a este proyecto de grado, por último y no menos importante al docente Nelson Fernández por dedicarnos su tiempo y todo su conocimiento para culminar este trabajo.

Daniela Amaya Cortés

Agradezco a Dios por darme la oportunidad, la voluntad, la fuerza y salud para este gran logro en mi vida. A mi familia, a mi padre, Fernando Ángel Gutiérrez Hernández, mi madre, María Eugenia Sánchez González, mi hermana Ashly Katerine Gutiérrez Sánchez por ser mi mayor ejemplo de constancia y del amor incondicional, por su apoyo en cada paso que daba, por cada consejo que me han dado. También a mis compañeros que hicieron parte de mi vida universitaria, a todos los docentes que brindaron su granito de arena para culminar este logro. A mi casa estudio Fundación Universidad de América que con todo el personal hicieron más fácil este proceso. A mi compañera de trabajo de grado Daniela Amaya quien me brindo la confianza para este paso tan importante.

Francisco Javier Gutiérrez Sánchez

CONTENIDO

	pág
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 GENERALIDADES DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA	21
1.1.1 Localización	21
1.1.2 Generalidades acerca de la SNSM	
1.1.3 Localización del mineral Barita en la Sierra Nevada de Santa Marta	23
1.2 GENERALIDADES DE LA BARITA	24
1.2.1 Barita	24
1.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA	25
1.4 PROPIEDADES ANALIZADAS AL MINERAL BARITA	26
1.4.1 Propiedades físicas del mineral barita	26
1.4.2 Propiedades ópticas	27
1.4.3 Propiedades mecánicas	28
1.5 FLUIDOS DE PERFORACIÓN	30
1.5.1 Funciones del lodo	30
1.5.2 Clasificación de los fluidos de perforación	31
1.5.2.1 Lodos base agua	32
1.5.2.2 Lodos base aceite	33
1.5.3 Pruebas de laboratorio del lodo de perforación base agua	33
1.5.3.1 Densidad	33
1.5.3.2 Reología	35
1.5.3.3 Viscosidad API	37
1.5.3.4 Filtración	37
1.5.3.5 pH	38
1.5.3.6 Porcentaje de arena	39
1.5.3.7 Porcentaje de líquidos y de sólidos	39
1.5.3.8 Prueba azul de metileno	40
2. METODOLOGIA Y DATOS	41
2.1 DISEÑO METODOLOGICO	41
2.1.1 Etapa 1	42
2.1.1.1 Pruebas físicas	42
2.1.1.2 Pruebas químicas	43

2.1.2 Etapa 2	43
2.1.3 Etapa 3	52
2.1.4 Etapa 4	53
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
3.1 CARACTERIZACIÓN BARITA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA	54
3.2 DESEMPEÑO DE LA BARITA DE LA SNSM Y ALTOS DE LA GUAJIRA	58
3.2.1 Cantidad de barita	61
3.2.2 Análisis de prueba mbt	62
3.2.3 Análisis retorta	63
3.2.4 Análisis contenido de arena	64
3.2.5 Análisis viscosidad de embudo	65
3.2.6 Análisis reología	66
3.2.7 Análisis ph	70
3.3 ANÁLISIS PRUEBAS QUÍMICAS	71
3.3.1 Análisis pm	71
3.3.2 Análisis pf	72
3.3.3 Análisis calcio	73
3.3.4 Análisis mf	74
3.3.5 Análisis cloruros	75
3.3.6 Análisis dureza total	76
3.4 ANÁLISIS FINANCIERO	78
3.4.1 Caso 1 empresas prestadoras de servicios	78
3.4.2 Caso 2 de Barita como commodity	78
3.4.3 Caso 3 barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y Altos de la Guajira	79
3.4.4 Análisis y comparación de resultados	81
3.3.5 Relación costo-beneficio	82
4. CONCLUSIONES	84
5. RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXOS	89

LISTA DE CUADROS

	pág
Cuadro 1. Tipos de hábito	26
Cuadro 2. Clasificación de transparencia	28
Cuadro 3. Escala de dureza de Mohs	29

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Rangos del mineral.	42
Tabla 2. Formulación base	43
Tabla 3. Cantidad de barita	44
Tabla 4. Pruebas al lodo	52
Tabla 5. Resultados barita convencional.	54
Tabla 6. Resultados barita SNSM	55
Tabla 7. Resultados barita Altos de la Guajira	56
Tabla 8. Lodo convencional.	58
Tabla 9. Lodo SNSM.	59
Tabla 10. Lodo Altos de la Guajira	60
Tabla 11. Resultados	77
Tabla 12. Empresas prestadoras de servicios	78
Tabla 13. Barita como commodity	79
Tabla 14. Precio barita SNSM y Altos de guajira	79
Tabla 15. Tipo de vehículo	80
Tabla 16. Molienda barita	80
Tabla 17. Precio final barita	81
Tabla 18. Comparación precios barita	81
Tabla 19. Precio por 12'500.000 sacos	82

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Coordenadas SNSM	22
Figura 2. Zona de recolección SNSM	23
Figura 3. Zona de recolección Altos de la Guajira	24
Figura 4. Barita de Sierra Nevada de Santa Marta	25
Figura 5. Funciones de los fluidos de perforación	31
Figura 6. Clasificación de los fluidos de perforación	32
Figura 7. Balanza de lodos	34
Figura 8. Viscosímetro	35
Figura 9. Embudo Marsh	37
Figura 10. Filtro prensa API	38
Figura 11. pH-metro.	39
Figura 12. Kit determinación contenido de arena	39
Figura 13. Retorta	40
Figura 14. Diseño metodológico	41
Figura 15. Procedimiento prueba densidad	44
Figura 16. Procedimiento Viscosidad de embudo	45
Figura 17. Procedimiento Reologia	45
Figura 18. Procedimiento Filtro prensa	46
Figura 19. Procedimiento retorta	46
Figura 20. Procedimiento Contenido de arena	47
Figura 21. Procedimiento Azul de metileno	47
Figura 22. Prueba azul de metileno	48
Figura 23. Procedimiento pH- colorimétrico	48
Figura 24. pH (tornasol)	48
Figura 25. Zona de titulación.	49
Figura 26. Procedimiento alcalinidad del lodo	49
Figura 27. Procedimiento alcalinidad del filtrado	50
Figura 28. Procedimiento metil naranja del filtrado	50
Figura 29. Procedimiento cloruros	51
Figura 30. Procedimiento dureza	51

LISTA DE ECUACIONES

	pág
Ecuación 1. Peso específico o densidad relativa	27
Ecuación 2. Ecuación de densidad	34
Ecuación 3. Viscosidad aparente.	36
Ecuación 4. Viscosidad plástica.	36
Ecuación 5. Relación costo-beneficio	53
Ecuación 6. Total barita del proyecto	80

LISTA DE GRÁFICAS

	pág
Gráfica 1. Comparación de la gravedad específica y sulfato de bario	57
Gráfica 3. Cantidad de Barita	61
Gráfica 4. Resultados MBT	62
Gráfica 5. Resultados retorta	63
Gráfica 6. Resultados contenidos de arenas	64
Gráfica 7. Resultados Viscosidad de Embudo	65
Gráfica 8. Viscosidad plástica.	66
Gráfica 9. Punto cedente	67
Gráfica 10. Gel 10 segundos	68
Gráfica 11. Gel 10 minutos	69
Gráfica 12. pH	70
Gráfica 13. Prueba Química, Pm.	71
Gráfica 14. Prueba Química, Pf.	72
Gráfica 15. Prueba Química, cal.	73
Gráfica 16. Prueba Química, mf.	74
Gráfica 17. Prueba Química, Cl.	75
Gráfica 18. Prueba Química, Dureza T.	76

RESUMEN

Se presenta a continuación el trabajo de grado que tiene como propósito la caracterización del mineral barita recolectado de la Sierra Nevada de Santa Marta y Altos de la Guajira, como el estudio del comportamiento y rendimiento de la barita en lodos de perforación base agua, todo esto llevado a escala de laboratorio, para finalizar con la relación costo beneficio de la implementación de la barita recolectada. Se tuvo en cuenta tres tipos de barita que con fines metodológicos se mencionan como la convencional (utilizada en los laboratorios de lodos y aguas en la Fundación Universidad de América), la de la Sierra Nevada de Santa Marta y la de Altos de la Guajira.

Para dar respuesta a la pregunta de investigación ¿Las baritas recolectadas de la Sierra Nevada de Santa Marta y Altos de la Guajira son viables para implementar en lodos de perforación base agua? Se realizaron nueve (9) pruebas de laboratorio, tres por cada barita, donde se encuentra que la densidad del material es baja con respecto a Normas Internacionales, , el pH es estable a lo largo de las pruebas, las cantidades de barita necesaria para dar peso al lodo, que sin importar el contenido de bario las cantidades variaron en un promedio de 3% por prueba, así como la acumulación de los geles que fue baja por tanto la acumulación de partículas finas no es un problema con las baritas analizadas.

Con respecto a la evaluación del costo beneficio el mayor costo- beneficio resulta ser para la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y los Altos de la guajira debido a una reducción de costos en la cadena de suministro del mineral extraído directamente de una mina que es resguardada por comunidades indígenas, esto reduce los costos que este proyecto pueda tener y aumenta en un 53% los beneficios al vender el producto final.

Se concluye que la barita estudiada tanto en la Sierra Nevada de Santa Marta como en Altos de la Guajira posee propiedades físico químicas adecuadas para ser utilizada en lodos de perforación base agua, presenta unos costos mucho más bajos en comparación con productos importados, y aunque su baja densidad no le permitiría competir en mercados internacionales, su costo compensaría ventajosamente el mayor material a dosificar para mezclas tipo como las aquí estudiadas.

palabras clave: lodos de perforación, barita, sierra nevada santa marta, altos de la guajira

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de grado se evalúa el desempeño del mineral barita de la Sierra Nevada de Santa Marta en un fluido de perforación, enfocado en las propiedades de este mineral de forma física como química, esto para hacer uso al máximo del mineral que produce este lugar y a su vez reducir el desperdicio del mineral, debido a que uno de los principales usos de la barita en el mundo es en el lodo de perforación, en donde la necesidad del mineral abarca grandes volúmenes, Colombia mundialmente consume un 0,64% en la importación de Barita anual de los 658 millones de dólares que representa la comercialización del mineral.

En la actualidad Colombia genera una gran importación del mineral barita, donde se estima que 5.000 sacos de barita al mes son necesarias para un campo típico en Colombia¹; recalcando que para suplir dicha necesidad, surge una alternativa importante entre los yacimientos de barita que hay en Colombia, y es que la Sierra Nevada de Santa Marta cuenta con una geología adecuada para la concentración de vetas de barita, mineral utilizado en la preparación de lodos de perforación a condiciones físico-químicas ; sin embargo, existe un **desconocimiento del desempeño de la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta en el uso como densificante en el fluido de perforación base agua** para la industria de hidrocarburos. Trabajando con una minería artesanal y en zonas de bajo desarrollo económico se presenta además una oportunidad de contar con un abastecimiento nacional, dando como reflejo que la poca caracterización que se tiene al mineral barita de la SNSM, ha impedido su comercialización y por ende general unos costos mayores al importar para suplir con la necesidad de barita en la industria petrolera.. La barita que se encuentra en la Sierra Nevada de Santa Marta aún no se ha clasificado como apta para actividades de perforación, por lo tanto, en este trabajo se propondrá una solución a la incertidumbre que se tiene con las propiedades fisicoquímicas del mineral barita de la Sierra Nevada de Santa Marta.

El presente trabajo de grado se apoyó en investigaciones previas tales como: "Control estructural de las mineralizaciones de Barita y Cobre en los corregimientos de Caracolí y Camperucho, Cesar Colombia." De autores A, Zuluaga. W, Torrenegra. F, Lascarro en donde trata de comprender la estructura geológica de las zonas de Caracolí y Camperucho, brinda información de fallas y concentraciones del mineral, y dan aportes para tener un mayor entendimiento acerca de la geología en la cual se está dando el mineral barita².

¹ Caracol Radio, Importaciones, [EN LINEA], [consulta el 15 de octubre del 2019], Disponible en: https://caracol.com.co/emisora/2018/06/07/santa_marta/1528386261_251213.html

² Zuluaga, A. Torrenegra, W. Lascarro, F. Control estructural de las mineralizaciones de Barita y Cobre en los corregimientos de Caracolí y Camperucho, Cesar Colombia. En: Boletín de Geología. Vol. 41, 2019

En el artículo “Caracterización sísmica de cuerpos de arena frontales del delta en la cuenca del valle bajo del Magdalena y su potencialidad como reservorio en la Ciénaga de Oro, Colombia.”, realizado por E, Niño. K, Manfurt. Y C, Molinares, se estudia su ubicación, los límites de la Sierra Nevada de Santa Marta, además de como se ve afectan las fallas, haciendo énfasis a un posible reservorio de hidrocarburos.

Por último “Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera”, por J, Melgarejo. J, Proenza. S, Gali y X, Llovet. En donde muestra las técnicas analíticas más utilizadas en la caracterización mineral, y su aplicación a la exploración y explotación minera, esto para darle un mayor entendimiento de las prácticas a ejecutar en el mineral y medio por el cual se forma³.

El presente trabajo de grado se enfoca en caracterizar físico-químicamente, muestras recolectadas del mineral en afloramientos artesanales del Norte de Colombia, mediante pruebas estandarizadas de laboratorio. Una vez se comprueba la idoneidad del material para ser utilizado como aditivo inerte en lodos de perforación base agua, se procede a hacer un comparativo económico contra costos publicados de mineral disponible en forma comercial (todos ellos importados), y de un análisis costo beneficio, involucrando todos los factores en la cadena de comercialización, se presentan unos resultados que permiten postular los yacimientos de barita del Norte de Colombia, como buenos candidatos para evaluaciones económicas más detalladas, a partir de los buenos resultados de laboratorio.

³ Melgarejo, J. Proenza, J. Gali, S y Llovet, X. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. En: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 62. 2010.

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se definirán los aspectos generales que corresponden a la ubicación del muestreo realizado, del fluido de perforación y sus características, además de las propiedades petrofísicas del mineral barita, objeto de este estudio, así como las generalidades en las pruebas que se realizan tanto al mineral como al lodo de perforación, la recopilación de esta información amplía las definiciones con las cuales se tendrá una base de apoyo para el debido entendimiento del proyecto.

1.1 GENERALIDADES DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA

El mineral barita recolectado para el presente estudio fue muestreado en el área de La Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), uno de los lugares más conocidos en Colombia el cual además de ser un gran punto turístico, cuenta con grandes depósitos minerales tales como carbón, barita, entre otras.

1.1.1 Localización. El área de estudio corresponde a la parte noroccidental de Suramérica, en los piedemontes nororiental, suroriental y noroccidental de la SNSM, en Colombia. La zona principal de estudio corresponde al piedemonte occidental de la SNSM en el sector de Los Indios al norte del Río Ariguaní, Magdalena, y adicionalmente tres zonas de estudio secundarias. La primera al norte de la SNSM, al sur de la Troncal de Caribe a lo largo del Río Corual en los alrededores del municipio Dibulla en el departamento de la Guajira (Colombia). La segunda ubicada al sureste de la SNSM, al noroeste de la ciudad de Valledupar en el departamento del Cesar entre los ríos Palmar y Calderas. Y la tercera al norte del municipio de San Juan Cesar en el departamento de la Guajira⁴

1.1.2 Generalidades acerca de la SNSM. La SNSM es un macizo montañoso aislado de la cordillera de los andes, situado al norte de la república de Colombia, entre los 10° 01' 05" y 11° 20' 11" de latitud al norte y los 72° 36' 16" y 74° 12' 49" de longitud al oeste del meridiano de Greenwich, en el extremo noroccidental de Suramérica. Se eleva abruptamente desde las costas del mar Caribe y a tan sólo 42 kilómetros alcanza una altura de 5.775 metros en sus picos nevados, con una

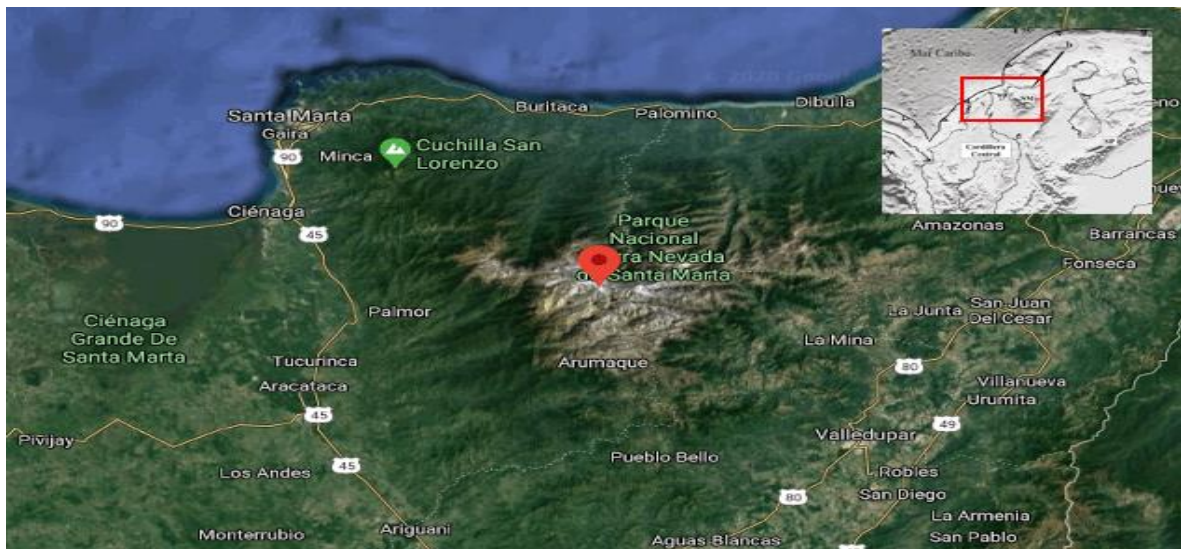
⁴ Gómez Plata, Cristhian Nicolás. Estratigrafía y análisis de proveniencia de la Formación Los Indios, y su relación con la evolución tectónica de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). Diss. Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, 2017.

superficie aproximada de 17.000 km². es la montaña costera más alta del mundo, independiente y aislada de la cordillera de los andes por zonas llanas y semiáridas⁵.

Desde el punto de vista geológico, la SNSM corresponde a un macizo de rocas cristalinas tanto metamórficas como ígneas de diferente naturaleza. La barita generalmente está asociada a venas hidrotermales en rocas sedimentarias, o en cavidades en rocas ígneas.

El Batolito de Santa Marta (BSM), es un cuerpo, constituido por al menos tres facies magmáticas diferentes, identificables por sus variaciones texturales y en menor medida, por sus variaciones composicionales. Tales pulsos son de una composición de cuarzo diorita a tonalita y a granodiorita (BSM), comprendiendo los términos de una secuencia TTG (Duque, 2009). El BSM (**Figura 1**), actualmente separa dos complejos de unidades en su costado NW y SE; que se diferencian tanto por su posición estructural como por su composición. Las unidades del costado NW, se dividen en un secuencia volcánica de afinidad MORB (Cardona et al, 2010) que han sufrido una deformación en condiciones de metamorfismo de bajo grado y un complejo de esquistos micáceos y horbléndicos (Doolan, 1971), que están intrínsecamente asociados con el batolito por ser afectados por diques y silos⁶

Figura 1. Coordenadas SNSM



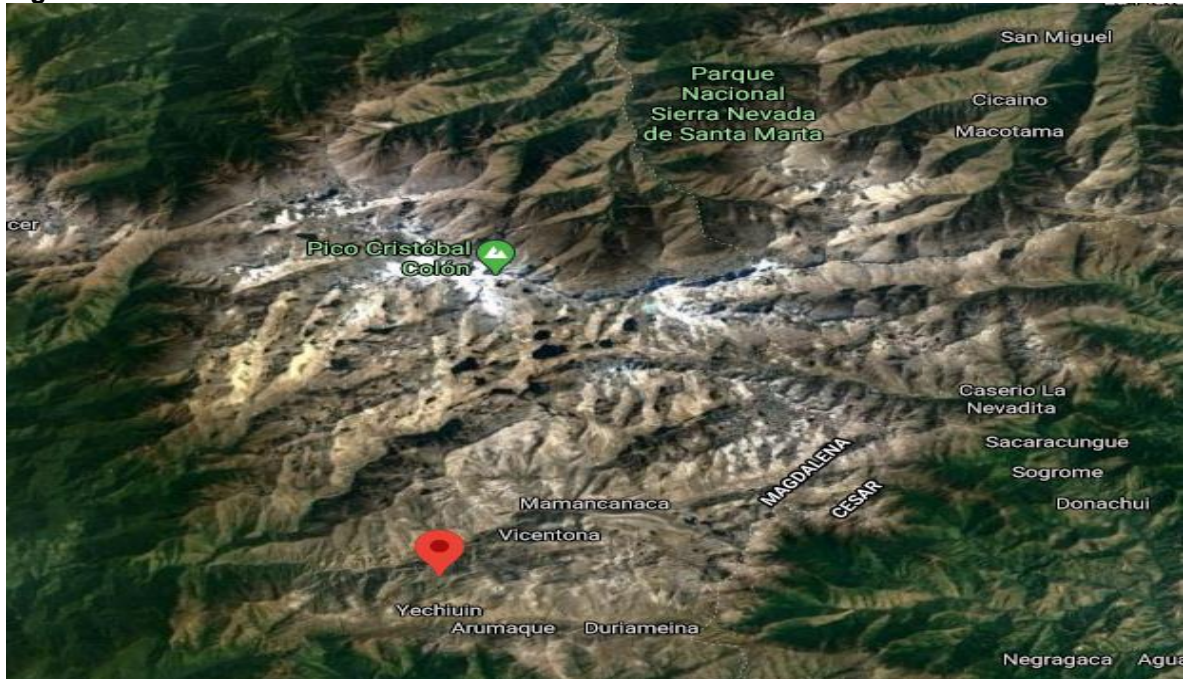
Fuente: elaboración propia.

⁵ SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA, parque nacional natural. (2020). Organización Colparques. Bogotá-Colombia, recuperado de <http://www.colparques.net/SIERRA>

⁶ Gómez, Cristhian, geología, Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Estratigrafía y análisis de proveniencia de la formación Los Indios, y su relación con la evolución tectónica de la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). 2017. P7

1.1.3 Localización del mineral Barita en la Sierra Nevada de Santa Marta. El área de estudio corresponde a la parte noroccidental de Suramérica, ubicada en los departamentos del Magdalena, Cesar y Guajira en jurisdicción de los municipios de Ciénaga, San Juan del Cesar, Fundación, Aracataca, Mingueo, y cerca a Ciudades como Santa marta, Riohacha y Valledupar⁷. En el documento se hace el estudio de dos muestras recolectadas en dos diferentes zonas; donde la primera corresponde a Vicentamegua donde el municipio más cercano es Aracataca, por otro lado la segunda zona de extracción se encuentra en los Altos de la Guajira entre la ranchería Jaturrumou y la ranchería Kaipana con coordenadas cercano al municipio de Uribí. Se resalta que son dos muestras recolectadas entre las ubicaciones mencionadas, las cuales se tendrán en cuenta en el capítulo financiero a la hora de medir los costos que genera el transporte de la barita entre el punto de recolección, el municipio más cercano a la mina y el municipio donde se realizará la molienda. **Figura 2 y la Figura 3.**

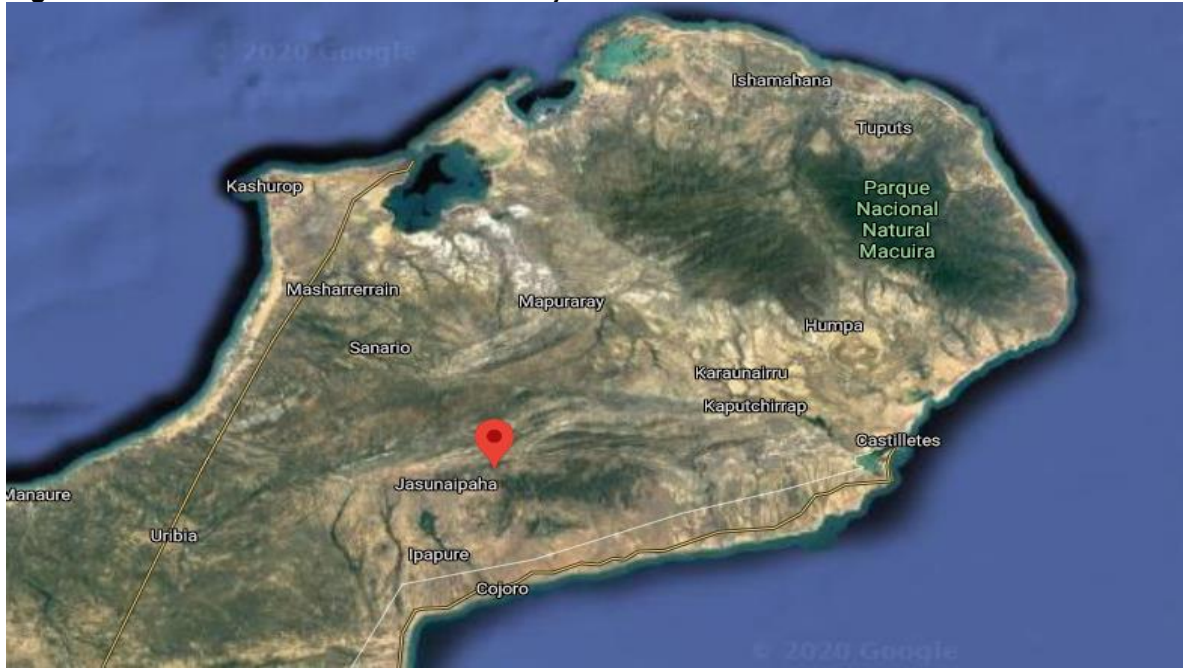
Figura 2. Zona de recolección SNSM



Fuente: elaboración propia.

⁷ Ibid.

Figura 3. Zona de recolección Altos de la Guajira



Fuente: elaboración propia

1.2 GENERALIDADES DE LA BARITA

La barita se explota actualmente en 66 países, siendo China (3,5 Mt), India (0,9 Mt) y EE.UU. (0,4 Mt) los mayores productores (Searls, y también poseedores de las mayores reservas, juntos representan el 67,2% de las reservas mundiales (Véras, 2006). Aproximadamente el 90% de la barita producida en el mundo está destinada al uso perforación de pozos petroleros y una parte significativa del 10% restante destinado a la fabricación de carbonato de bario para la fabricación de gafas de televisión.⁸

1.2.1 Barita. El grupo de minerales al que pertenece la barita tiene una estructura ortorrómbica y fórmula general $A(SO_4)$, donde A puede ser bario (barita), estroncio (celestita) o plomo (anglesita). La barita ($BaSO_4$ - sulfato de bario) es el mineral el mineral de bario más común y abundante, que contiene un 58,8% de Ba. Sin embargo, la presencia de otros elementos puede reducir significativamente este contenido. La barita aparece con mayor frecuencia como un mineral blanco incoloro lechoso o gris, y puede tener otros colores dependiendo de las impurezas presentes en la red cristalina **Figura 4**. La barita tiene una fractura concoidea, hendidura prismática, brillo vítreo, transparente a cristal translúcido e índice de refracción 1,63. Es el mineral más denso entre los no metales (densidad alrededor de 4,5 g / cm³),

⁸ Luz, A. B. D., & Baltar, C. A. M. (2008). Barita. CETEM. P. 295

siendo relativamente friable, con dureza variable entre 2,5 y 3,5 en la escala de Mohs.⁹

Figura 4. Barita de Sierra Nevada de Santa Marta



Fuente: elaboración propia

1.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

La caracterización de un mineral es la especificación de sus propiedades para su debida clasificación y distinción con respecto a otros minerales previamente caracterizados. Las rocas se componen de diferentes minerales los cuales varían unas de otras gracias a las diferentes condiciones en las que estas se han formado, existen tres grupos grandes en donde se puede empezar a caracterizar el mineral, estos grupos son: Rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas.

Entre las propiedades físicas se tiene la dureza, color, resistencia al rayado, peso específico y densidad, etc. Seguido de exámenes más detallados en ayuda de equipos para su debido análisis microscópico, los cuales evidencian propiedades

⁹ Ibid. P.297

específicas como lo es la forma de los cristales que componen el mineral en cuestión, micro fracturas y magnitudes indetectables en un examen físico.

1.4 PROPIEDADES ANALIZADAS AL MINERAL BARITA

A continuación, se hará una descripción de las propiedades físicas, químicas, mecánicas y ópticas que se le realizan al mineral barita, tomando como referencia los procedimientos descritos por la norma ASTM C-295.

1.4.1 Propiedades físicas del mineral barita. Las propiedades físicas de un mineral son las más fáciles de determinar, en vista que, con una simple inspección “visual” o ensayos sencillos se pueden demostrar estas características entre ellas el hábito, peso específico y conductividad.

- **Hábito:** también llamado “las caras de un cristal” se refiere a las proporciones de las caras de un cristal como se ilustra en el **Cuadro 1**, la forma de hábito más común encontrado en la barita es el tabular.

Cuadro 1. Tipos de hábito

HABITO	CARACTERISTICA
Acicular	Como pelo, como aguja
Columnar	Alargado en una dirección y semejante a las columnas
Prismático	Alargado en una dirección
Tabular	Alargado en dos direcciones
Laminar	Alargado en una dirección y con bordes finos
Hojoso	Similar a las hojas, que fácilmente se separa en hojas
Brotoidal	Grupo de masas globulares
Reniforme	Vibras radiadas, que terminan en superficies redondeadas
Granular	Formado por un agregado de granos
Masivo	Compacta, irregular, sin ningún hábito sobresaliente

Fuente: elaboración propia con base en WOLFGANG G. Apuntes de geología. Propiedades de los minerales. 2005., Chile. [en línea], Disponible en: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap02a.htm>

- **Peso específico o densidad relativa:** el peso específico o densidad relativa de un mineral es la relación entre el peso de ese mineral y el peso del mismo volumen de agua a 4 °C, temperatura en la que el agua alcanza su máxima densidad, 1 g/cm³. Como es una relación, se expresa solo con un número, es un valor adimensional, sin unidades expresada en la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Peso específico o densidad relativa

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{sus}}{\rho_{H2O @ 4^{\circ}C}}$$

Fuente. MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. Peso específico o densidad relativa. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006, P14.

Donde:

- ρ_{rel} = Densidad relativa
 - ρ_{sus} = Densidad de la sustancia
 - ρ_{H2O} = Densidad del agua
-
- **Conductividad:** se define como la capacidad del mineral para transmitir la corriente eléctrica; ahora bien, existen metales más conductores que otros como los minerales con sulfuros y con contenido de óxidos.
-
- 1.4.2 Propiedades ópticas.** Propiedades visibles al incidir la luz sobre un mineral, las propiedades que se mostrarán a continuación son sencillas de identificar, puesto que con un vistazo a la roca o mineral son identificables las características. Propiedades como el brillo, transparencia, luminiscencia y color
- Brillo:** una propiedad que describe el aspecto que presenta la superficie de mineral cuando refleja la luz. El brillo no tiene relación alguna con el color del mineral. El brillo de un mineral puede ser vítreo, metálico, adamantino y sedoso entre otros.
 - **Transparencia:** los minerales, según permitan el paso de la luz, se pueden clasificar como se establece en el **Cuadro 2**:

Cuadro 2. Clasificación de transparencia

Clasificación	Característica
Transparente	Se llaman sustancias transparentes aquellas que dejan ver los objetos a través de ellas. El cristal de roca o cuarzo incoloro es un ejemplo de esta propiedad.
Translucido	Se llaman sustancias translúcidas aquellas que al pasar la luz permite ver los objetos con cierta dificultad. Ejemplos de ellas son las placas relativamente finas de ónix y jade mexicanos.
Opacos	Las sustancias son opacas cuando no transmiten la luz aunque las capas sean muy finas, por ejemplo, la pirita.

Fuente: elaboración propia con base en Gobierno de México, museo virtual propiedades físicas de los minerales, 2017. [en línea]. Disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Propiedades-Fisicas.html>

- **Color:** es el color que presenta el mineral. Puede ser determinante en algunos minerales como la azurita (azul), olivino (verde oliva), azufre (amarillo), malaquita (verde)...
- **Luminiscencia:** algunos minerales, como la fluorita, emiten luz al ser iluminados con luz ultravioleta.¹⁰

1.4.3 Propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas de los minerales dependen del comportamiento del mineral frente a la aplicación de fuerzas en su superficie. Las principales propiedades mecánicas de los minerales son dureza, tenacidad, fractura y exfoliación.

- **Dureza:** es la resistencia que ofrece la superficie de un mineral a ser rayada. Depende de la estructura (cuanto mayores sean las fuerzas de enlace, mayor será la dureza). Para cuantificar la dureza se utiliza la escala de Mohs que toma como referencia 10 minerales y sus durezas relativas¹¹, como se visualiza en el **Cuadro 3**.

¹⁰ Ciencias de la naturaleza, 2017, QUINCENA, http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/EDAD_1eso_07_minerales_y_rocas/contenido/1q7/pdf/quincena7.pdf

¹¹ Ibid.P.7

Cuadro 3. Escala de dureza de Mohs

MINERAL	DUREZA	COMPOSICIÓN	SISTEMA	OBSERVACIÓN
Talco	1	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Mon	Tacto graso, séctil
Yeso	2	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Mon	Brillo vítreo o sedoso
Calcita	3	$CaCO_3$	Rom	Fosforescente
Fluorita	4	CaF_2	Iso	Exfoliación octaédrica
Apatito	5	$Ca_5(PO_4)_3(F, OH, Cl)$	Hex	Exfoliación mala
Ortoclasa	6	$KAlSi_3O_8$	Mon	Feldespatos potásico
Cuarzo	7	SiO_2	Rom-Hex	El más abundante
Topacio	8	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$	Ort	Exfoliación perfecta
Corindón	9	Al_2O_3	Rom	Alterado pasa a mica
Diamante	10	C	Iso	Brillo adamantino

Fuente. Adaptado de BRAUNS. R. Mineralogía, Labor, 1927 y CORNELIUS & CORNELIS. Manual de mineralogía de DANA, Reverté S. A. 1985.

- **Tenacidad:** concepto que califica la resistencia cohesiva del mineral a diferentes tipos de esfuerzos; alude a como el mineral se deja romper, desgarrar, moler o doblar. Las clases de tenacidad son: frágil (sí rompe), como la calaverita, la margarita y la pirita; maleable (sí da láminas), como el cobre, la plata y el platino; séctil (sí se deja rebanar), como la acantita y el bismuto; dúctil (sí da hilos), como el oro y el cobre; flexible (sí se deja doblar), como el grafito y la molibdenita; y elástica (sí recupera su forma después de un esfuerzo), como la moscovita, la flogopita y la biotita.¹²
- **Fractura:** es el carácter de la superficie de rompimiento que muestra un mineral que no presenta exfoliación o partición, sea el mineral amorfo o cristalino (en el segundo caso la ruptura podrá estar controlada por el cruce del mineral).

Según el tipo de superficie (no plana), se hablará de fractura concoidea (en concha) como el vidrio, la pirita y el cuarzo; fibrosa (en astilla) como la plata, el hierro y el cobre nativos; ganchuda (dentada); irregular (desigual) como el oro nativo, etc.¹³

¹²Duque, Escobar Gonzalo, minerales, MANUAL DE GEOLOGIA PARA INGENIEROS, 2017, P118

¹³ Ibid P.117

- **Exfoliación:** Un mineral no amorfo tiende al crucero o clivaje, cuando por presión, se separe en planos de posición con una geometría definida. Se hablará de exfoliación cuando se generen láminas (la mica), o de partición cuando se originen cubos o prismas (la magnetita). El crucero se califica según su grado, de perfecto, bueno o imperfecto.¹⁴

1.4.4 Propiedades químicas. Miden la capacidad de reaccionar con otras sustancias. Todos los minerales se pueden reconocer por ciertas propiedades químicas que presentan, por ejemplo, al conocer los elementos de los cuales están formados y cómo reaccionan con determinados reactivos.

- **Reacción con ácidos:** la calcita reacciona con el ácido clorhídrico y se descompone desprendiendo dióxido de carbono.
- **Solubilidad:** formación de una disolución en agua, como el yeso. Algunos minerales solubles poseen sabor salado, como la halita y la silvina.
- **Radiactividad:** emisión de partículas atómicas, como la uraninita.¹⁵

1.5 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Un fluido de perforación es una mezcla homogénea entre un fluido base (agua, aceite y gas) y aditivos químicos con unas propiedades fisicoquímicas específicas, empleados en la etapa de perforación de un pozo de petróleo y gas.

Este fluido circula a través de la sarta de perforación hasta la broca y regresa a la superficie por el espacio anular y es almacenado en el sistema de tanques para su posterior tratamiento.

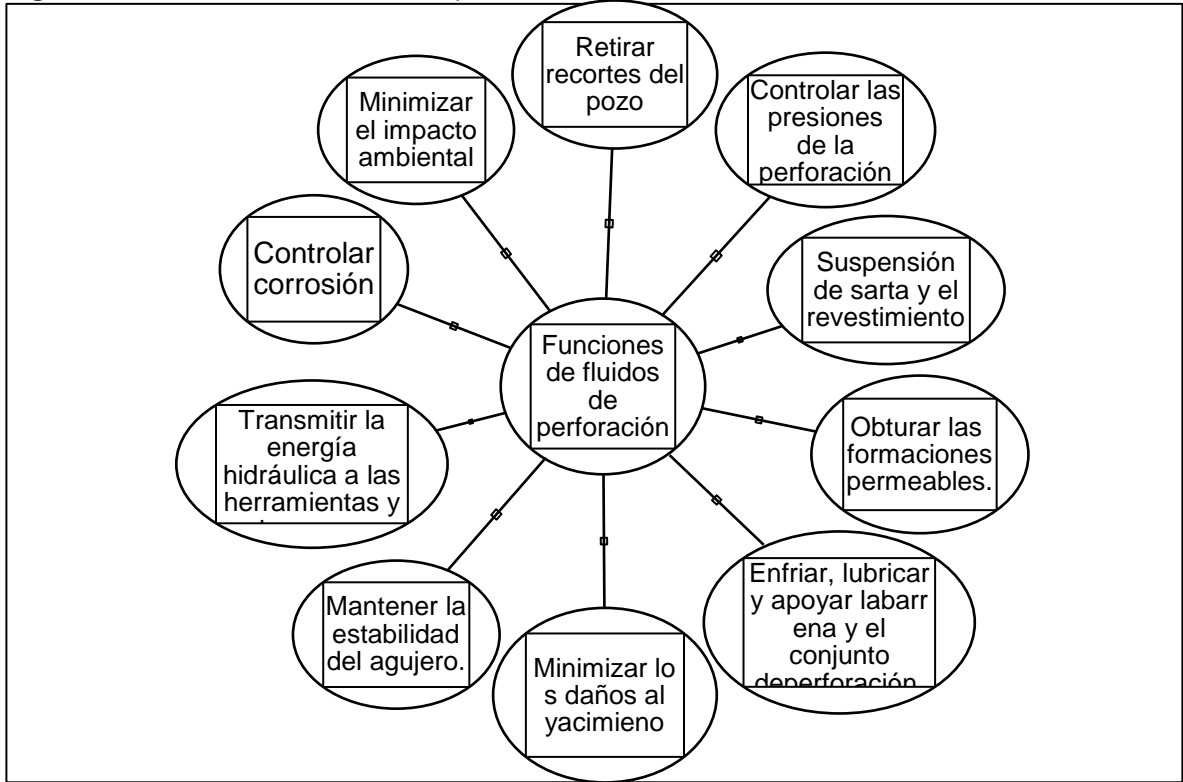
1.5.1 Funciones del lodo. Para lograr los objetivos determinados en la construcción y diseño de un pozo petrolero es necesario cumplir con las especificaciones que conlleva esta actividad incluyendo la realización de los lodos de perforación, los cuales se identifican en la **Figura 5**.

¹⁴ Ibid P.117

¹⁵ Ciencias de la naturaleza, 2017, QUINCENA,

http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/EDAD_1eso_07_minerales_y_rocas/contenido/1q7/pdf/quincena7.pdf

Figura 5. Funciones de los fluidos de perforación



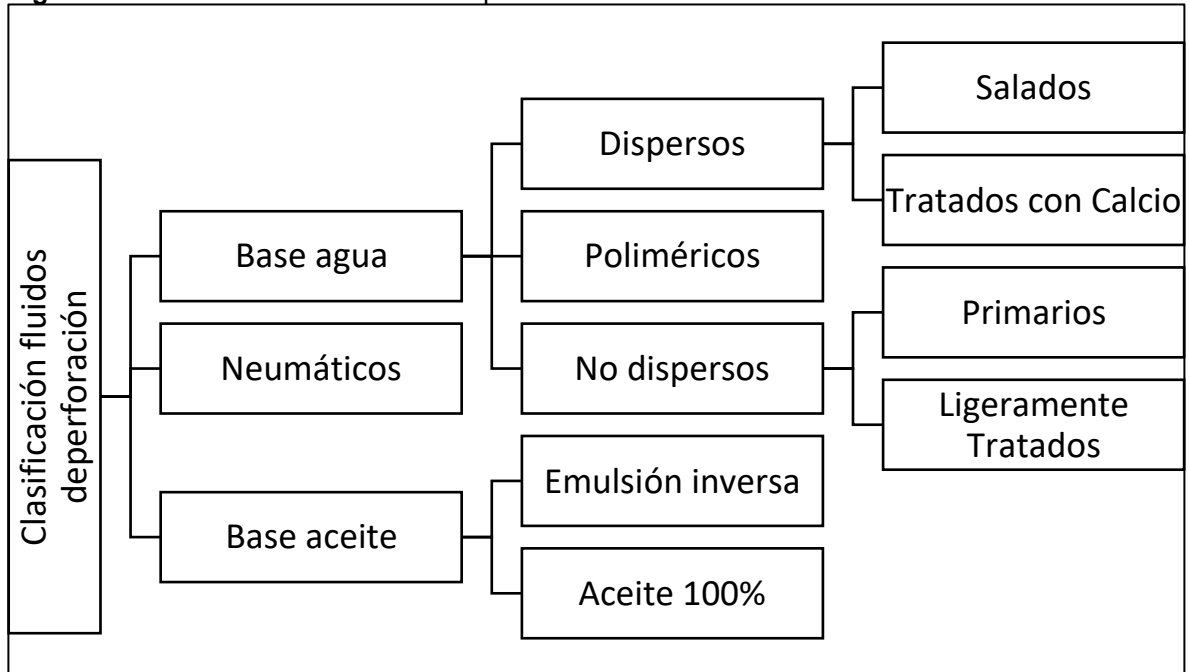
Fuente: elaboración propia con base en LOPEZ Jonathan. Cap 2 funciones de los fluidos, 2001.

1.5.2 Clasificación de los fluidos de perforación. En el diseño de un lodo de perforación hay variables como económicas, ambientales y operaciones que definen el tipo de lodo que se va a circular. Los lodos se clasifican de acuerdo a su fase continua o base entre ellas están los lodos base agua, base aceite y fluidos neumáticos o dependiendo de los aditivos que lo constituyen¹⁶.

Para la investigación se va a centrar la atención en fluidos de perforación base agua y en lodos poliméricos, la clasificación de los fluidos de perforación se visualiza en la **Figura 6**.

¹⁶ Maldonado, Angela. FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN DE BASE AGUA DE ALTO RENDIMIENTO APLICADOS AL CAMPO BALCÓN COMO SUSTITUTOS DE LODO BASE ACEITE, Bucaramanga, 2006, p28. Trabajo de grado, universidad industrial de santander.

Figura 6. Clasificación de los fluidos de perforación



Fuente. Elaboración propia.

1.5.2.1 Lodos base agua. Se caracteriza porque la fase continua es agua salada o agua dulce y la clasificación de estos lodos son:

- **Lodos no dispersos:** utilizados para perforar pozos poco profundos o los primeros metros de pozos profundos (lodos primarios), en la mayoría de casos compuesto de agua dulce, bentonita y cal apagada (hidróxido de calcio).
- **Lodos dispersos:** muy útiles cuando se perfora a grandes profundidades o en formaciones altamente problemáticas, pues presentan como característica principal la dispersión de arcillas constitutivas, adelgazando el lodo.¹⁷
- **Lodo polimérico:** un lodo polimérico es la dilución de un polímero en agua para formar un gel. Los polímeros son moléculas en forma de cadena, que actúan uniendo iones a su estructura, de tal manera que forman agregados moleculares. La tendencia que tenga el polímero de unir a su estructura una u otra molécula y cómo sea esa unión, es lo que diferencia los polímeros entre sí.

Las posibilidades ilimitadas de desarrollo de polímeros hacen que sean aplicables a prácticamente cada función del fluido de perforación. La tecnología de los polímeros permite realizar análisis a nivel molecular y diseñar un polímero que reúna

¹⁷ POMA MAMANI, Jose Luis, Fluidos de perforación, FACULTAD DE TECNOLOGIA, 2009, P1-2

las propiedades específicas requeridas para una aplicación determinada. Por este motivo, los polímeros tienen un futuro ilimitado en los fluidos de perforación.

Existen muchos tipos de polímeros orgánicos en función de su naturaleza química. La elección de perforar con uno u otro polímero la marcan distintos factores como el terreno que se va a atravesar o el método de perforación.¹⁸

1.5.2.2 Lodos base aceite. Fluidos cuya fase continúa o externa es un aceite como diesel o aceite mineral o una proporción de agua que se encuentra emulsionada. Se utiliza en casos donde se requiera una alta estabilidad del fluido e inhibición, en pozos de alta temperatura, huecos profundos, pegas y desestabilización de hueco. Son más costosos que los fluidos de perforación base agua por sus componentes y la disposición final de los sólidos, generando mayor contaminación.¹⁹

- **Los fluidos de emulsión inversa:** son emulsiones de agua en aceite con salmuera de cloruro de calcio como la base emulsificada y el aceite como la fase continua. Pueden contener hasta el 50% volumen de salmuera en la fase líquida. Los fluidos de emulsiones “relajadas” son aquellos fluidos que tienen bajas estabilidad eléctrica y altos valores de pérdida de filtrado. La concentración de aditivos y el contenido de salinidad se varían para controlar las propiedades reológicas, las propiedades de filtración y la estabilidad de la emulsión
- **Los fluidos base aceite:** son formulados con puro aceite como la fase líquida y son más utilizados como fluidos para cortar núcleos. Algunas veces estos sistemas utilizan agua de la formación en su preparación, sin adicionar agua o salmuera adicional. Los sistemas de puro aceite requieren gran cantidad de agentes para producir viscosidad (comúnmente ácidos grasos y derivados de aminas)²⁰

1.5.3 Pruebas de laboratorio del lodo de perforación base agua. Conocer las propiedades fisicoquímicas de un fluido de perforación es de vital importancia a la hora de estar perforando un pozo, se reconocen las condiciones en las que se está corriendo los fluidos preparados específicamente para cada uno de los proyectos establecidos. Estas pruebas son la densidad, reología, viscosidad API, filtración, pH, porcentaje de arena, porcentaje de líquidos y sólidos y MBT.

1.5.3.1 Densidad. La densidad se define como la cantidad de masa que ocupa un volumen, y se calcula mediante la **Ecuación 2.**

¹⁸ Quimacer,; Minería pozos de agua y prospección, ADITIVOS PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN, 2013, p5

¹⁹ Maldonado Angela Maria, FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN DE BASE AGUA DE ALTO RENDIMIENTO APLICADOS AL CAMPO BALCÓN COMO SUSTITUTOS DE LODO BASE ACEITE, Bucaramanga, Colombia, 2006, P32

²⁰ Ibid P3

Ecuación 2. Ecuación de densidad

$$\rho = \frac{m}{v}$$

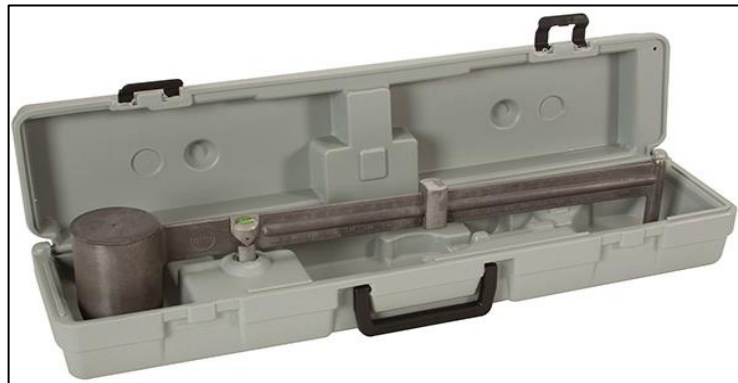
Fuente. MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. Densidad. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006, P13.

Donde:

- ρ = Densidad
- m = masa
- v = Volumen

Una de las principales funciones de la densidad es suministrar la presión hidrostática requerida en el pozo para mantener el balance de presiones, este valor no puede ser elevado, ya que podría fracturar la formación, idealmente se busca que un fluido de perforación tenga una densidad similar a la del agua buscando con ella altas velocidades de penetración. Las unidades con la que se expresa la densidad en la industria petrolera es la de libras por galón (lbg). La densidad se mide en una balanza de lodos como se muestra en la **Figura 7**, esta balanza permite conocer además de la densidad, la gravedad específica y el gradiente de presión por cada mil pies.

Figura 7. Balanza de lodos



Fuente. Perfoblogger. (20 enero/2016). Balanza de lodo. [en línea]. Disponible en: <http://perfob.blogspot.com/2016/01/densidad-del-lodo-y-su-importancia.html>

Cuando se tiene una densidad que no es la requerida, esta se puede incrementar mediante la adición de materiales densificantes; en la industria se cuenta con productos químicos, entre los más usados se encuentran.

- Baritina.
- Carbonato de calcio.
- Óxidos de hierro.
- Cloruro de sodio.
- Cloruro de potasio.
- Cloruro de calcio.

1.5.3.2 Reología. Esta propiedad se encarga de medir la deformación que sufre un fluido de perforación a medida que avanza la operación de perforación, con algunas mediciones realizadas a dicho fluido se puede determinar si este fluirá bajo ciertas condiciones como temperatura, presión y velocidades de corte. Hay diferentes propiedades reológicas, algunas se describen a continuación. La reología se mide mediante un viscosímetro rotacional mostrado en la **Figura 8**

Figura 8. Viscosímetro



Fuente. Perforador 2.0. (30 de noviembre, 2017). Viscosímetro rotatorio. [en línea]. Disponible en: <https://perforador20.wordpress.com/2017/11/30/viscosimetro-rotatorio/>

- **Viscosidad aparente (VA):** es la viscosidad de un fluido medida a una determinada velocidad de corte y a una temperatura fija, la ecuación que se emplea para calcular la viscosidad aparente es la que se muestra en la **Ecuación 3** y **Figura 8**, y es aquella que surge por la fricción mecánica entre.
 - ✓ Sólidos
 - ✓ Sólido y líquido
 - ✓ Líquido y líquido

Ecuación 3. Viscosidad aparente.

$$VA = \frac{600rpm}{2}$$

Fuente: energy API. Manual fluido de perforación, P3.6.

Donde:

- VA= Viscosidad aparente
- 600rpm= Lectura de 600

Esta depende de la concentración, tamaño y forma que puedan tener los sólidos presentes en el fluido de perforación, como medida de control se cuenta con equipos mecánicos encargados del control de sólidos. Este control se hace indispensable, con el propósito de mejorar el comportamiento reológico del fluido. Para obtener altas tasas de penetración (ROP) se debe tener en cuenta la viscosidad plástica, si esta se lleva a un alto punto cedente (medida de la fuerza de atracción entre partículas) permite que la limpieza del hoyo sea más fácil y efectiva.²¹

- **Viscosidad plástica (VP):** la viscosidad plástica se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica entre los sólidos presentes en el fluido de perforación y se calcula mediante la **Ecuación 4**.

Ecuación 4. Viscosidad plástica.

$$VP = 600rpm - 300rpm$$

Fuente: energy API. Manual de fluido de perforación P3.6.

Donde:

- VP= Viscosidad plástica
- 600rpm= Lectura 600
- 300rpm= Lectura 300
- **Resistencia de geles:** es una de las propiedades más importantes del lodo, debido a que representa una medida de las propiedades tixotrópicas del fluido y mide la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas.²² La fuerza de geles indica una medida del esfuerzo o ruptura de la consistencia de un gel ya formado. La tasa de geles es el tiempo que se requiere para que se forme el gel, si el gel se forma lentamente después del reposo, la tasa de gel es baja y si se forma rápidamente la tasa de gel es alta.

²¹ Ibid., p. 21

²² HALLIBURTON Op. Cit., p. 22.

Su medición se efectúa en viscosímetro rotacional de indicación directa, esta medida se toma a los 10 minutos y a los 10 segundos²³.

1.5.3.3 Viscosidad API. También llamada viscosidad embudo se usa para comparar la fluidez que tiene un líquido con la del agua, se mide mediante un embudo Marsh como muestra la **Figura 9**. Esta medida indica el tiempo que tarda en pasar 1000 ml de lodo por el embudo Marsh

Figura 9. Embudo Marsh



Fuente. Perforador 2.0. (18 de noviembre, 2017). Embudo Marsh. [en línea]. Disponible en: <https://perforador20.wordpress.com/2017/11/18/embudo-marsh/>

1.5.3.4 Filtración. La filtración sucede cuando la presión hidrostática producida por la columna del fluido en el pozo es mayor a la presión de la formación, esto genera que una porción del fluido de perforación migre hacia la formación, generando un revoque o torta en fase sólida en la roca que se encuentra en contacto con el fluido.

Existen dos tipos de filtraciones que se pueden dar en el pozo.

- **Filtrado estático:** se genera cuando el lodo se encuentra en reposo; esto desarrolla un aumento en el espesor de la torta a medida que transcurre el tiempo, teniendo como efecto una reducción de filtrado hacia la formación.
- **Filtrado dinámico:** se genera cuando el lodo se encuentra en movimiento, lo que desarrolla una torta delgada en la roca que se encuentra en contacto con el fluido, sin embargo, este tipo de filtrado aumenta la cantidad de fluido que migra hacia la formación.

²³ COINSPETROL. Propiedades de los fluidos de perforación .Blogger, 2005

Para determinar la cantidad de filtrado se tienen múltiples métodos, entre los cuales se resaltan:

- **Filtrado API:** método utilizado para conocer la filtración estática de un fluido de perforación en base agua a temperatura ambiente y una presión diferencial de 100psi, usando una prensa de filtrado estático y papel filtro
- **Filtrado alta presión alta temperatura (HPHT):** método usado usualmente para conocer la filtración estática de un fluido de perforación a una temperatura de 300°F y una presión diferencial de 500psi²⁴

La filtración se realiza en un filtro prensa API (**Figura 10**), que determina la pérdida de agua que pasa hacia la formación permeable cuando el fluido de perforación es sometido a una presión diferencial.²⁵

Figura 10. Filtro prensa API



Fuente. Shanghai skyblue. (s.f). PRENSA API FILTRO. [en línea]. Disponible en: <http://www.civil-test.com/es/api-filter-press-101.html>

1.5.3.5 pH. El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrogeno en un fluido. Cuando se elabora un fluido de perforación, el conjunto de aditivos usados para lograr las propiedades de densidad, viscosidad y gelatinosidad le otorgan al fluido una naturaleza ácida o alcalina por medio del PH-metro como se muestra en la **Figura 11**. Esta alcalinidad o acidez del fluido influye en las paredes de la formación perforada, el control de la corrosión, el rendimiento

²⁴ Ibid., p. 21

²⁵ Ibid., p. 22

de arcillas, en la pérdida de filtrado entre otros factores. La mayoría de los fluidos de base acuosa son alcalinos y el rango de pH que manejan estos fluidos es de 8 a 12.²⁶

Figura 11. pH-metro.



Fuente: energy API. Manual fluido de perforación, P3.17

1.5.3.6 Porcentaje de arena. Durante la perforación en un pozo el porcentaje de arena debe mantenerse en valores bajos medida por instrumentos como se muestra en la **Figura 12**, para así evitar que los equipos sufran daños, debido a que la arena puede comportarse abrasivamente y causar graves desgastes en la tubería y equipos utilizados.²⁷

Figura 12. Kit determinación contenido de arena



Fuente: energy API. Manual fluido de perforación, P3.11

1.5.3.7 Porcentaje de líquidos y de sólidos. Esta medición se realiza mediante una prueba de retorta (**Figura 13**), con esta se le puede conocer el porcentaje de bentonita, sólidos no reactivos de formación y arcilla de formación los fluidos base agua. Los resultados que se obtienen a partir de esta prueba tienen como objetivo

²⁶ Ibid., p. 15.

²⁷ ENERGY,API. Procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación &NBSP; Dallas, Texas: Instituto Americano del petróleo, 2001

conocer mediante el análisis de sólidos, el porcentaje de solidos de alta y baja gravedad especifica que hay en la formación.²⁸

Figura 13. Retorta



Fuente: energy API. Manual de fluidos, P3.12

1.5.3.8 Prueba azul de metileno. También llamado comúnmente methylene blue test, se define como la medida que tiene un fluido de concentración total de sólidos arcillosos reactivos. Esta prueba es realizada también a los recortes perforados y da un estimado del intercambio catiónico de la formación.²⁹

²⁸ PDVSA, Op. Cit., p. 15

²⁹ HALLIBURTON Op. Cit., p. 57

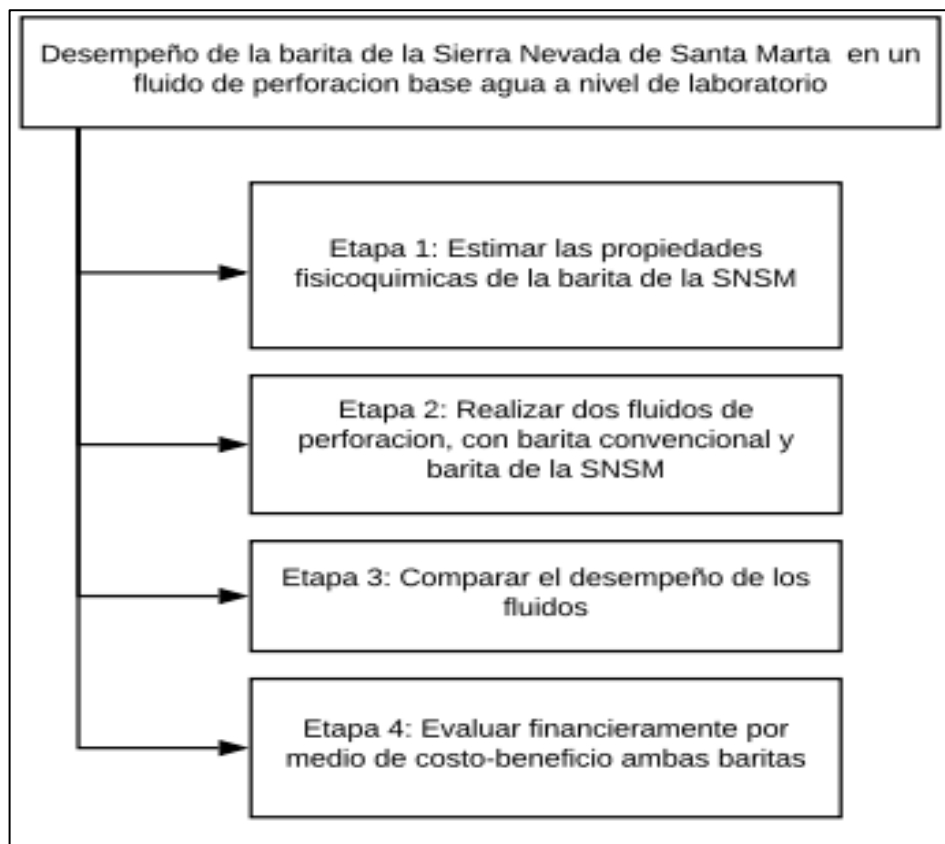
2. METODOLOGIA Y DATOS

En este capítulo se abarca el diseño metodológico de esta investigación, en donde se realizará la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la barita de la SNSM, luego se continuará con la descripción de los fluidos de perforación, elaborados a nivel de laboratorio, junto con las pruebas que se les realizara a los fluidos, para constatar que el mineral proviene de la SNSM se adjunta un certificado como **Anexo A**.

2.1 DISEÑO METODOLOGICO

El diseño metodológico parte del aspecto principal del presente trabajo de grado, el cual consta de realizar un desempeño de la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta como se ilustra en la **Figura 14**.

Figura 14. Diseño metodológico



Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Etapa 1: estimar las propiedades fisicoquímicas de la barita de la SNSM.

Para el desarrollo de esta etapa es importante la caracterización de la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta a una escala de laboratorio así como la caracterización del mineral recolectado en los altos de la guajira, esto con el fin de ampliar los resultados que se obtendrá en la realización de pruebas tanto físicas (densidad, diámetro de partícula, granulometría, dureza), como químicas (ph, solubilidad, porcentaje de bario, óxido de hierro, oxido de aluminio, oxido de silicio, oxido de calcio, y oxido de magnesio). dichas pruebas se regirán bajo la normatividad dada por el instituto americano del petróleo, api spec 13a, donde se dictan los rangos que deben cumplir los minerales para ser utilizados como se muestran en el **Tabla 1**.

Tabla 1. Rangos del mineral.

Propiedad	Valor	Unidad
Tamaño de partícula	3-74	Micrones
Densidad	4.2-4.5	g/cm ³
Pureza	92<	%
Calcio	<250	ppm

Fuente: elaboración propia con base en API SPEC 13A

2.1.1.1 Pruebas físicas. A continuación, se mencionan las pruebas que se le realizaron a la barita de la SNSM y de los altos de la guajira

- **Hábito:** se toma el mineral y se visualiza el hábito que está entre los rangos establecidos en el **Cuadro 2**
- **Brillo:** se toma el mineral y se acerca a la luz solar más cercana para identificar las variaciones de su brillo
- **Color:** se toma el mineral y se identifica el color
- **Transparencia:** se lleva el mineral a la luz solar más cercana, se identifica la capacidad del mineral al dejar pasar la luz, su transparencia se identifica según el **Cuadro 3**.
- **Tenacidad:** se toma el mineral y se golpea con un objeto contundente y determinamos la facilidad que tiene el mineral para romperse, rasgarse y/o molerse
- **Dureza:** se lima el mineral y según el **Cuadro 4** se define la resistencia que ofrece al ser rayado.
- **Densidad:** el mineral previamente pulverizado se introduce al instrumento le chatelier que contiene aceite mineral y la densidad se lee con el desplazamiento del aceite por la barita.

- **Diámetro de partícula:** con un molino de bolas se llevó el proceso de triturar el mineral para luego pasarlo por el tamizador de una malla de 200 mesh, el equipo maneja una vibración lo cual permite que la partícula pase por la malla.

2.1.1.2 Pruebas químicas. Se mencionan las pruebas químicas que fueron implementados en el mineral barita de la SNSM y de los altos de la guajira.

- **Ph:** parte del mineral es introducida en agua y con la cinta medidora de pH es tomado este valor.

Nota: Para las pruebas de % de bario, óxido de hierro, óxido de aluminio, óxido de silicio, óxido de calcio y óxido de magnesio el mineral se introdujo en un biodigestor de la siguientes especificaciones:

- **% bario:** digestion, hach 8014.
- **Óxido de hierro:** digestión, SM 3111 B absorción atómica
- **Óxido de aluminio:** digestión, SM 3111 B absorción atómica
- **Óxido de silicio:** digestión, SM 4500 SI D
- **Óxido de calcio:** digestión, SM Ca D
- **Óxido de magnesio:** digestión, SM Mg D

Este proceso se llevó a cabo en un laboratorio que se muestra en el **Anexo B**.

2.1.2 Etapa 2: realizar dos fluidos de perforación, con barita convencional y barita de la SNSM. en la formulación del lodo base agua, se realizará bajo los mismos parámetros estipulados por el director del trabajo de grado, donde serán 3 lodos con la misma formulación para cada una de las baritas (tres tipos barita), un lodo con barita convencional marca fox bb white (lote 20182708), suministrada por la empresa comercial fox s.a.s. el otro con la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y el último con la barita de los altos de la Guajira, recalcando que a cada lodo se le harán pruebas en 9ppg, 10ppg y 11ppg, la formulación del lodo estará con base a la **Tabla 2** en 1000ml de agua, luego de la formulación base, se procede a agregar la cantidad de barita necesaria dependiendo la densidad a la cual se quiere llegar como muestra la **Tabla 3**.

Tabla 2. Formulación base

Aditivo	Cantidad	Unidad
Bentonita	45	gr
NaOH	1	ml
Poliacrilato de Sodio	2.1	gr

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Cantidad de barita

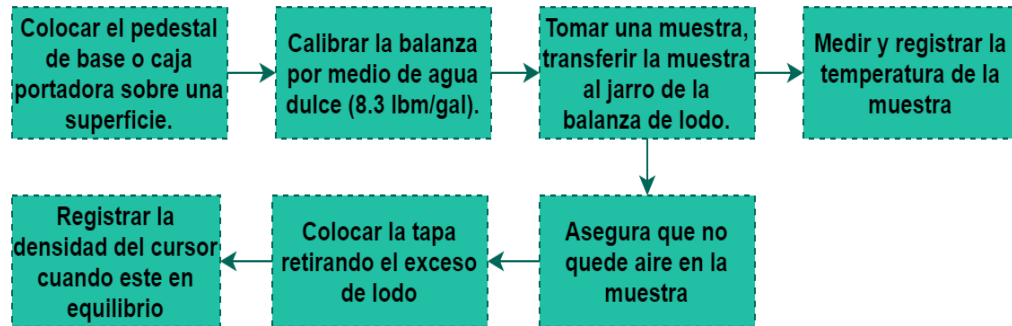
Densidad	Barita (gr)		
	Convencional	SNSM	Altos de la Guajira
9ppg	59.6	62.8	60.7
10ppg	239.7	253.5	245
11ppg	439.3	468.7	450

Fuente: elaboración propia.

Se debe tener en cuenta que a cada lodo se correrán pruebas físicas (densidad, viscosidad de embudo, reología, filtrado, retorta, contenido de arena, pH, MBT) y pruebas químicas (Pm, Pf, mf, Cloruros, dureza total y calcio)

- **Densidad:** El procedimiento para la densidad se encuentra en la **Figura 15** mediante la balanza de lodo **Figura 7**.

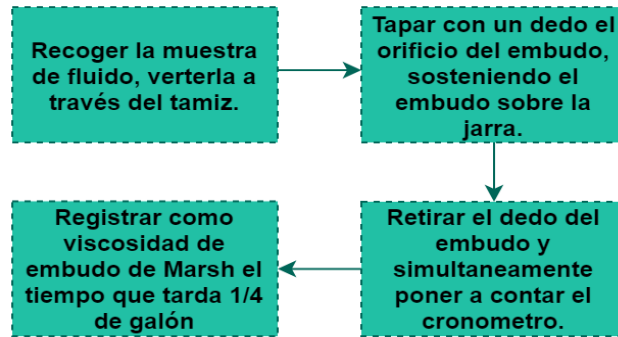
Figura 15. Procedimiento prueba densidad



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.3.

- **Viscosidad de embudo:** Para llevar a cabo esta prueba es necesario utilizar el embudo de marsh **Figura 9** y seguir el procedimiento establecido en la **Figura 16**.

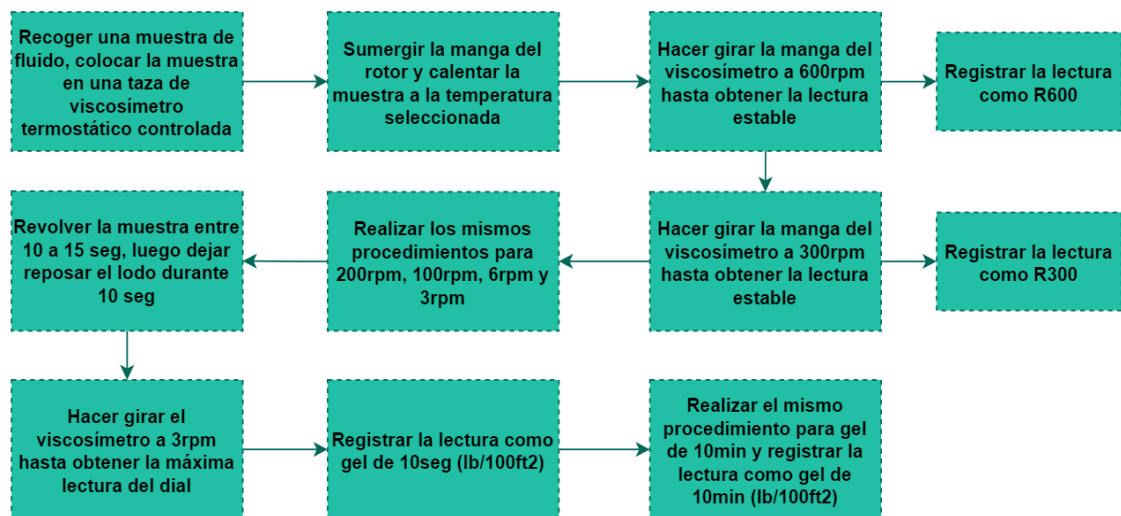
Figura 16. Procedimiento Viscosidad de embudo



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.4.

- **Reología:** Se lleva a cabo por medio del viscosímetro que se encuentra en la **Figura 8**, además del procedimiento de la **Figura 17**.

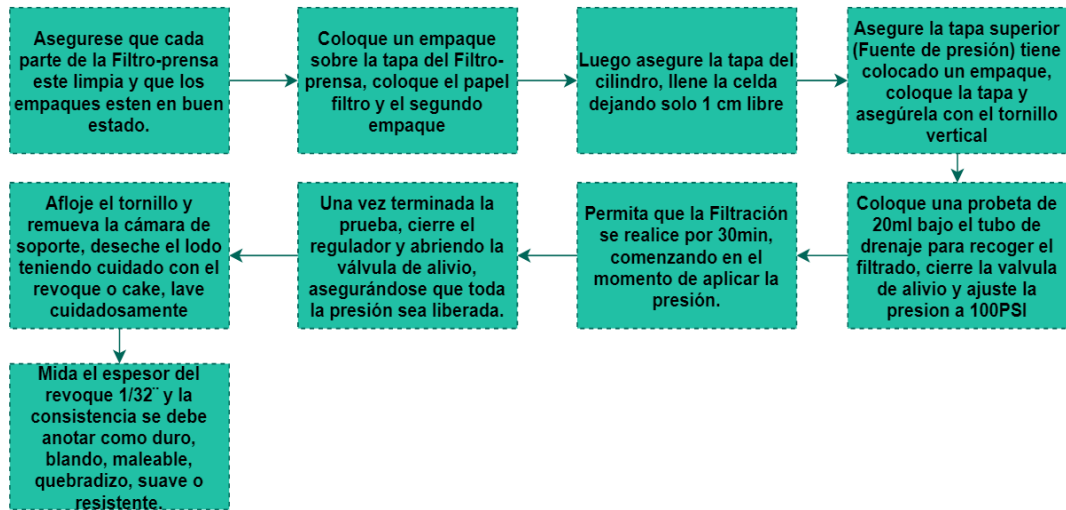
Figura 17. Procedimiento Reología



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.5.

- **Filtrado:** El filtrado se ejecuta por medio del equipo filtro prensa **Figura 10**, con sus partes, por otro lado el procedimiento que se debe llevar a cabo es representado en la **Figura 18**.

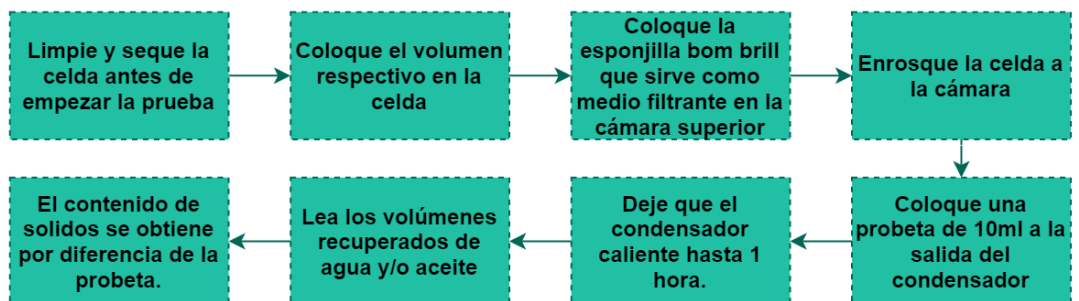
Figura 18. Procedimiento Filtro prensa



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.7.

- **Retorta:** Para la retorta se utiliza el equipo de la **Figura 13**, junto al procedimiento de la **Figura 19**.

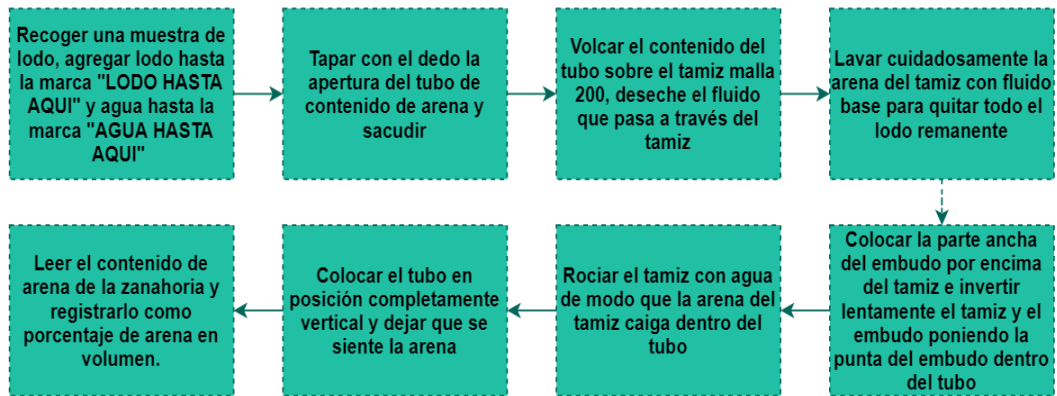
Figura 19. Procedimiento retorta



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual fluido de perforación, P 3.12

- **Contenido de arena:** Este procedimiento es mediante el kit determinación contenido de arena de la **Figura 12** y el procedimiento de la **Figura 20**.

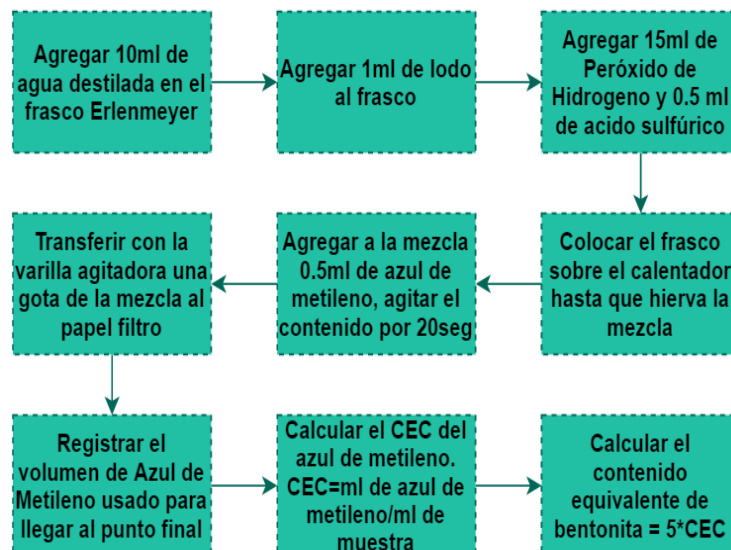
Figura 20. Procedimiento Contenido de arena



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.11.

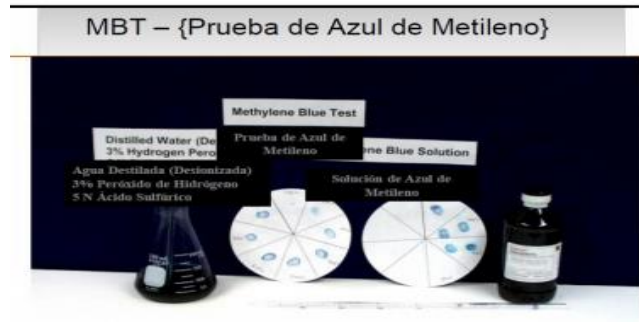
- **Azul de metileno:** Se ejecuta por medio del procedimiento de la **Figura 21** con los materiales de la **Figura 22**.

Figura 21. Procedimiento Azul de metileno



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.14.

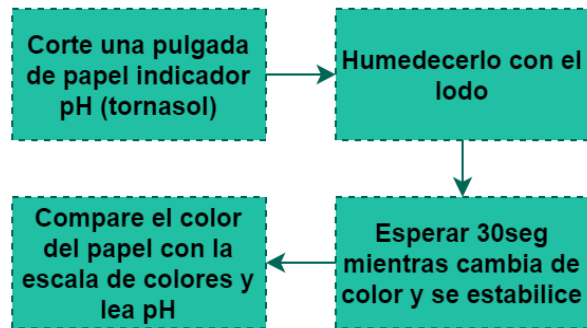
Figura 22. Prueba azul de metileno



Fuente: ENERGY API. Manual fluido de perforación, p 3.19.

- **pH:** Para el pH se utiliza el procedimiento del colorímetro indicada en la **Figura 23**, y los materiales de la **Figura 24**.

Figura 23. Procedimiento pH- colorimétrico



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, p 3.19.

Figura 24. pH (tornasol)



Fuente: ENERGY API. Manual fluido de perforación, P3.17

Hasta esta parte son los procedimientos físicos de las pruebas básicas en un lodo de perforación, a continuación son representadas las pruebas químicas que se realizan todas en la zona de titulación ilustrada en la **Figura 25**.

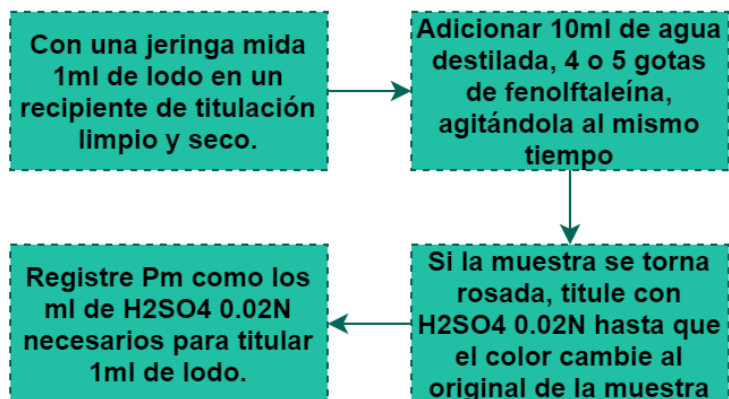
Figura 25. Zona de titulación.



Fuente: elaboración propia

- **Alcalinidad del lodo (pm):** para esta prueba, el procedimiento correspondiente de la **Figura 26**.

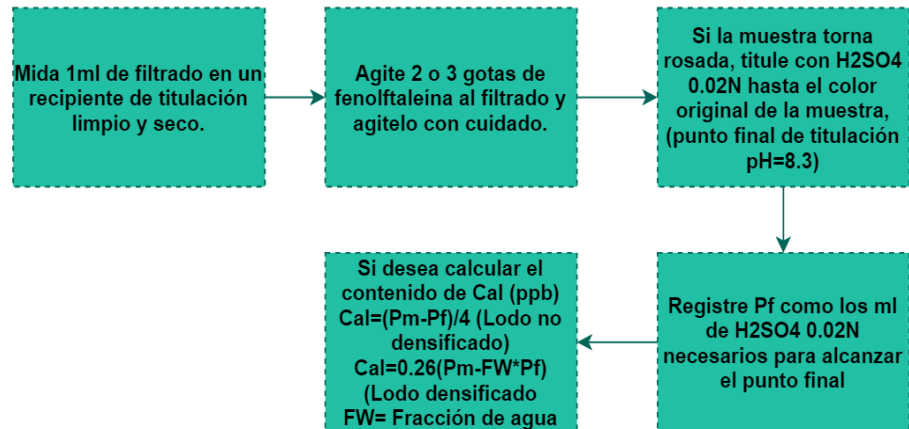
Figura 26. Procedimiento alcalinidad del lodo



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.16

Alcalinidad del filtrado (pf): se identifica el procedimiento de esta prueba en la **Figura 27**.

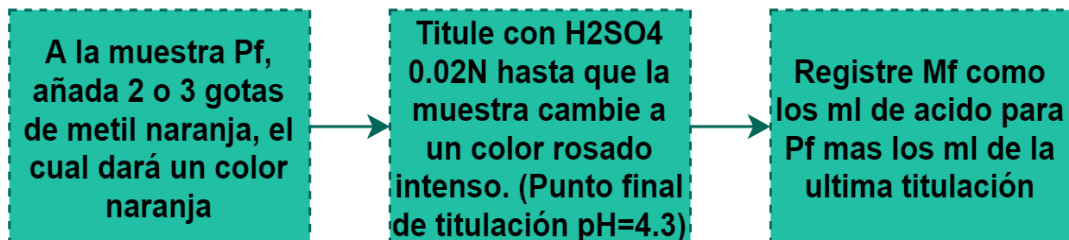
Figura 27. Procedimiento alcalinidad del filtrado



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API Manual de fluidos de perforación, P3.17.

- **Alcalinidad del metil naranja del filtrado (mf):** El procedimiento para esta prueba se realiza con el establecido en la **Figura 28**.

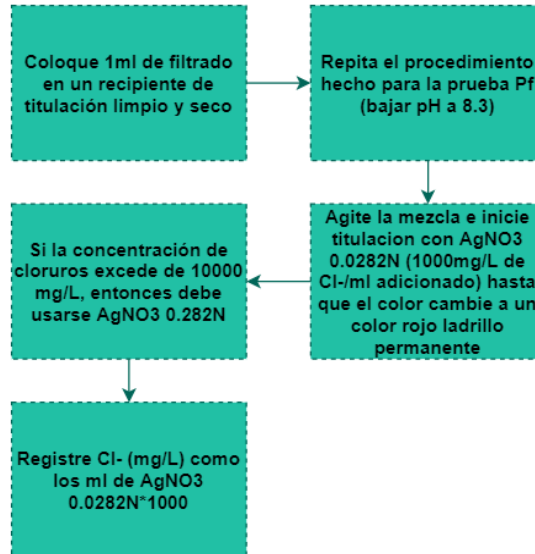
Figura 28. Procedimiento metil naranja del filtrado



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.17.

- **Cloruros:** En la prueba de cloruros se sigue los pasos de la **Figura 29**.

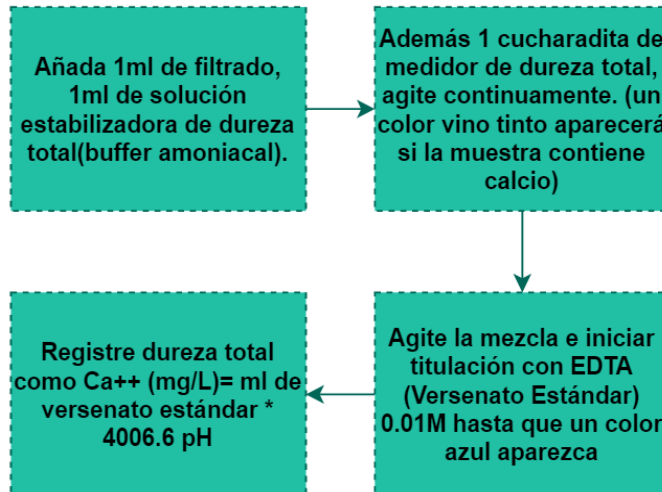
Figura 29. Procedimiento cloruros



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.21.

- **Dureza:** Para esta última prueba se lleva a cabo por medio de la **Figura 30**.

Figura 30. Procedimiento dureza



Fuente: elaboración propia con base en ENERGY API. Manual de fluidos de perforación, P3.22.

2.1.3 Etapa 3: comparar el desempeño de los fluidos. Para esta etapa, con base a los resultados que arrojen las pruebas para la barita convencional (fox bb white) a las diferentes densidades preestablecidas y el debido llenado del **Tabla 4**, serán el punto de partida para comparar y evaluar los resultados de los lodos de la barita de la sierra nevada de santa marta y altos de la guajira. esta comparación apoyándose del anexo c, que corresponde a las fichas técnicas de la barita implementada en los laboratorios de lodos y cementos de la fundación universidad de américa.

Tabla 4. Pruebas al lodo

Tipo de lodo: , Peso de lodo(ppg):	
Prueba	Resultados
Densidad (ppg)	
FV (sg/qt)	
600 rpm	
300 rpm	
200 rpm	
100 rpm	
6 rpm	
3 rpm	
PV (cP)	
YP (lb/100ft ²)	
AV (cP)	
Gel 10s (lb/100ft ²)	
Gel 10m (lb/100ft ²)	
Filtrado (cc/30min)	
% Agua	
% Solidos	
% Arena	
MBT	
pH	
Pm	
Pf	
Cal	
Mf	
Cl	
Dureza total	

Fuente: elaboración propia

2.1.4 Etapa 4: evaluar financieramente por medio de costo-beneficio ambas baritas. Para el desarrollo de la última etapa, se realizará una comparación entre los costos y beneficios en tres casos de la comercialización de la barita (empresas prestadoras de servicios, barita como commodity, barita extraída de la SNSM y altos de la Guajira), dicha comparación se va a implementar por medio de la evaluación económica del indicador costo beneficio en el transcurso de 5 años, con el fin de visualizar la viabilidad a mediano plazo, en el cual se va a estudiar cada caso por aparte, luego de haber realizado la viabilidad para cada una, se ejecutará una comparación entre las tres formas de comercio, los tres casos se van a evaluar mediante la ecuación 5

Ecuación 5. Relación costo-beneficio

$$RBC = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

Fuente: ORTEGA B., (2012). Análisis Coste-Beneficio. *eXtoikos*, 2012(5), P149.

Donde:

- RCB= relación costo beneficio
- Bt= Beneficio total
- Ct= Costo total

Con base a la **Ecuación 5** se puede determinar la viabilidad del proyecto al arrojar resultados mayores a 1. Lo que indica que los ingresos son superiores a los costos que este proyecto generará, es así como esta relación se hará en los tres casos expuestos para su debido análisis y comparación.

Se va a establecer la rentabilidad del proyecto mediante los costos que genera comprar saco de barita de 50 kilogramos en cada uno de los tres casos anteriormente mencionados y el promedio de sacos necesarios implementados en los pozos petroleros de Colombia en una proyección de 5 años.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados de la caracterización del mineral de la SNSM y AG, estos resultados están basados en el análisis de las características físicas y químicas con su debido análisis de las 9 pruebas de laboratorio hechas a diferentes densidades, en estos resultados se tienen en cuenta las variaciones entre los datos, dando enfoque en la capacidad de las baritas recolectadas de mejorar el rendimiento del lodo, bajas tasas de sólidos suspendidos, resistencia a los geles, los pH necesarios para evitar corrosión al correr el lodo y cantidades de filtrado. Los resultados que se obtienen en el análisis financiero se basan en información actualizada a abril del 2020 con los cuales se podrán comparar entre los tres casos mencionados cual es de mayor estabilidad.

3.1 CARACTERIZACIÓN BARITA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en laboratorio para la barita de referencia Fox White (**Tabla 5**), mineral barita de la Sierra Nevada (**Tabla 6**) y Altos de la Guajira (**Tabla 7**), para las propiedades físicas, químicas, mecánicas y ópticas. Además, el **Anexo B**, que da soporte de laboratorio a unas pruebas químicas solicitadas especialmente.

Tabla 5. Resultados barita convencional.

Físicas		Químicas	
Gravedad específica	3.7023	pH	7.8
Granulometría	0.075	% BaSO ₄	56.83
Color	Blanco		

Fuente: elaboración propia.

Los rangos de densidad entre las baritas estudiadas están en 3.3 y 3.7 g/ml, el **ANEXO C** muestra la ficha técnica de la barita Fox BB White (convencional) donde estipula una densidad nominal de 4.43 g/cc para la misma. Mediante la prueba de Le Chatelier se demostró que la densidad está muy por debajo de 4.43 g/cc lo cual sería lo ideal según la norma API SPEC 13^a en cambio dio un resultado de 3.7023 g/cc.

La Norma API SPEC 13^a especifica un mínimo de calidad de 4.1g/cc, requisito que es normal encontrar en especificaciones de perforación para Barita tipo Grado de perforación (Barite 4.1 – API Spec. 13^a – 20.1.1). No obstante, la existencia y disponibilidad de Barita de este tipo cada vez es más escasa, y esto ha llevado a

abrir la posibilidad de que minerales de menor densidad, aún requiriendo la dosificación de cantidades algo mayores para alcanzar las características deseadas, ganen espacio en los mercados locales³⁰. El presente estudio, por lo tanto, es relevante para proponer relaciones costo/beneficio que hagan atractivo el potencial uso de la Barita de la SNSM, para lo cual los análisis de laboratorio que a continuación se presentan dan las pautas para el entendimiento del comportamiento de este mineral, en mezclas de lodos típicas para condiciones del país.

Mientras que Dominguez et al³¹ reportan para la Barita Colombiana una $d=4.3$, la experiencia de especialistas en Colombia muestra que las baritas de uso común en Colombia raramente alcanzan una densidad de $d=3.9$ g/cc³²

La observación macroscópica del mineral barita recolectado tanto en la SNSM como en Altos de la Guajira, muestran impurezas que se manifiestan en el color rosado (Véase Fig 3), muy posiblemente debido a exceso de feldespatos tales como los describe Ortega (2011) para baritas en el Valle del Cesar. Tal vez es por esta razón que las densidades determinadas con la misma prueba para la barita de la SNSM y Altos de la guajira en comparación con el estándar Fox White son de un menor valor variando en un 11% y 4.3 % respectivamente, mientras que el cambio promedio entre ellas es de 0,27125 g/ml. Esta diferencia implicaría implementar más producto debido a que su gravedad específica es menor por ende un precio mayor para la mezcla.

Con respecto a la Norma API – Barita 4.1 (API 13A) la densidad está castigada en un 19% para la SNSM, y de un 13,6% para AG, resultando que la primera conclusión de este estudio es que los yacimientos de barita evaluados difícilmente pueden competir en mercados internacionales. Sin embargo, se hará la evaluación económica teniendo en cuenta esta baja especificación.

³⁰ Bruton, J. R., Bacho, J. P., & Newcaster, J. (2006, January 1). The Future of Drilling-Grade Barite Weight Material - A Case for a Substitute Specification. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/103135-MS

³¹ Domínguez Camargo, Carlos Andrés, and Nicolás Suárez Niño. *Evaluación de la eficiencia y costos de la barita importada de Perú respecto a la nacional como densificante en la perforación de un bloque en Campo Castilla*. BS thesis. Fundación Universidad de América, 2019.

³² Ing. Nelson Fernández, Comunicación Personal, Agosto 2020.

Tabla 6. Resultados barita SNSM

Físicas		Químicas	
Prueba	Resultados	Prueba	Resultados
Gravedad específica	3.3225	pH	8.3
Granulometría	0.075	Solubilidad	0.0002
Dureza	3-4	% bario	51.5
Hábito	Prismático y tubular	Óxido de hierro	0.05
Brillo	Vítreo	Óxido de aluminio	0.01
Color	Gris y blanca	Óxido de silicio	0.001
Transparencia	Opaca	Óxido de calcio	0.8
Tenacidad	Frágil	Óxido de magnesio	0.9

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados barita Altos de la Guajira

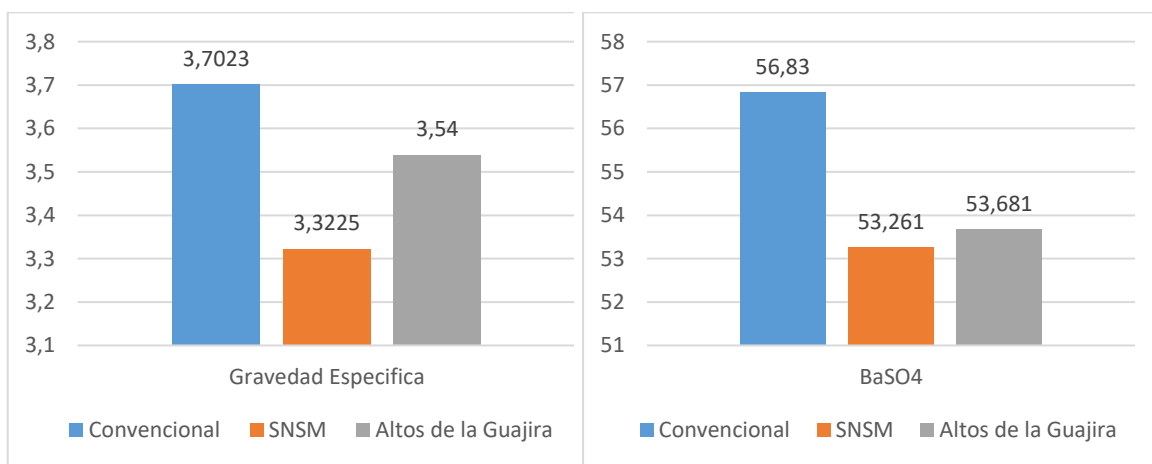
Físicas		Químicas	
Prueba	Resultados	Prueba	Resultados
Gravedad específica	3.54	pH	8.5
Granulometría	0.075	Solubilidad	0.00018
Dureza	3-4	% bario	53
Habito	Prismático y tubular	Óxido de hierro	0.02
Brillo	Vítreo	Óxido de aluminio	0.06
Color	blanca	Óxido de silicio	0.001
Transparencia	Opaca	Óxido de calcio	0
Tenacidad	Frágil	Óxido de magnesio	0.6

Fuente: elaboración propia.

Según análisis granulométrico por medio de tamizaje INVE-123-07 se identifica la Barita de la SNSM y Altos de la Guajira como un material fino que pasa por tamiz de 0.0075 (No 200 pasando el 100% del mineral por este tamiz); además de identificar en el laboratorio mediante pruebas simples características como su color blanco y gris, habito según las formas de sus cristales identificados como prismático y tabular, una transparencia opaca debido a que los rayos de luz no traspasan la roca sólida, tenacidad frágil determinada porque la resistencia que el mineral tiene ante el quiebre, es bajo; al reflejarse la luz en el mineral este tiende a tener un brillo Vitreo, según la escala de Mohs la dureza de este mineral oscila entre 3-4 debido a que puede ser rayado con una lima gruesa o en su defecto un cuchillo.

Por otro lado, en la **Gráfica 1** se observa la gravedad específica de las tres baritas obtenida por medio del instrumento le chatelier.

Gráfica 1. Comparación de la gravedad específica y sulfato de bario



Fuente: elaboración propia

En la **Gráfica 1** se observa la gravedad específica obtenida con el frasco de Le chatelier para las tres baritas en cuestión, con respecto a la cantidad de sulfato de bario encontrado en las mismas. Se debe tener en cuenta que el Sulfato de Bario está compuesto por óxidos en diferentes porcentajes en cada una de las baritas lo cual, al ser medidos, son determinantes en la variación de los resultados de gravedad específica, contando que a pesar de este cambio no se ve afectada su función esto debido a que el aditivo es un material inerte, por lo cual resulta en un aumento en el costo por la necesidad de una mayor cantidad del aditivo. Las variaciones que se observan entre la Barita convencional (Fox BB White) y las baritas recolectada guardan relación directa con la densidad, para la gravedad específica es directamente proporcional y con respecto a la cantidad de Sulfato de Bario el % de Bario es congruente con la densidad hallada en cada una de las baritas, si bien en la Barita convencional el aumento de este porcentaje es de 6.3%

con respecto a las demás, es debido a los pre tratamientos a los cuales la barita fue sometida.

3.2 DESEMPEÑO DE LA BARITA DE LA SNSM Y ALTOS DE LA GUAJIRA

A continuación, los registros de los resultados obtenidos de las pruebas básicas del laboratorio en un lodo de perforación para las tres baritas (convencional, SNSM y altos de la guajira), a distintas densidades establecidas de 9ppg, 10ppg y 11ppg, para empezar, se visualiza la tabla de la barita convencional, **Tabla 8**, para las densidades de 9, 10 y 11 ppg respectivamente.

Tabla 8. Lodo convencional.

PROPIEDADES	CONVENCIONAL		
	9ppg	10ppg	11ppg
Densidad (ppg)	9	10	11
FV (sg/qt)	35	46.08	94
600 rpm	68	35	48
300 rpm	60	26	36
200 rpm	56	21	29
100 rpm	49	18	23
6 rpm	25	9	12
3 rpm	19	7	7
PV (cP)	8	9	12
YP (lb/100ft ²)	42	17	24
AV (cP)	39	17.5	24
Gel 10s (lb/100ft ²)	15	7	7
Gel 10m (lb/100ft ²)	7	7	10
% Agua	95	94	90
% Solidos	5	6	10
% Arena	0.2	0.5	0.2
MBT	3	3	3
pH	10	10	7
Pm	0.3	0.5	0.2
Pf	0.2	0.3	0.1
Cal	0	0	0.2
Mf	0.2	0.2	0.1
Cl	0.3	0.3	0.2
Dureza total	0.5	0.1	0.5

Fuente: elaboración propia

Teniendo los resultados para el lodo convencional como punto de comparación se procede a obtener los resultados de las pruebas básicas del laboratorio en un lodo de perforación, a distintas densidades establecidas de 9ppg, 10ppg y 11ppg, las cuales se visualizan la tabla de la barita de la SNSM, **Tabla 9**, para las densidades de 9, 10 y 11 ppg respectivamente.

Tabla 9. Lodo SNSM.

PROPIEDADES	SNSM		
	9ppg	10ppg	11ppg
Densidad (ppg)	9	10	11
FV (sg/qt)	39	48.66	66.56
600 rpm	65	34	40
300 rpm	60	29	33
200 rpm	55	25	29
100 rpm	48	22	26
6 rpm	33	14	12
3 rpm	21	12	9
PV (cP)	5	5	7
YP (lb/100ft ²)	55	24	4.7
AV (cP)	32.5	17	20
Gel 10s (lb/100ft ²)	21	10	10
Gel 10m (lb/100ft ²)	35	10	11
% Agua	99	94	84
% Sólidos	1	6	16
% Arena	0.5	0.5	2.5
MBT	3	3	3
pH	9	9	9
Pm	0.6	0.35	0.55
Pf	0.3	0.3	0.25
Cal	0.2	0.2	0
Mf	0.15	0.25	0.2
Cl	0.5	0.3	0.25
Dureza total	0.48	0.4	0.5

Fuente: elaboración propia

Por último, se obtuvieron los resultados de las pruebas del lodo de los Altos de la Guajira, en la **Tabla 10** para las densidades de 9, 10 y 11 ppg respectivamente.

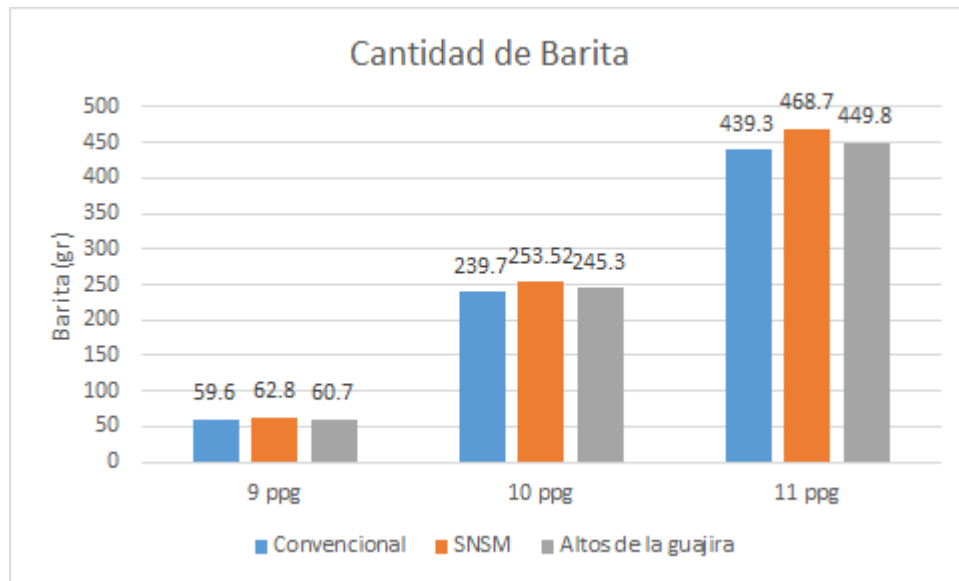
Tabla 10. Lodo Altos de la Guajira

PROPIEDADES	ALTOS DE LA GUAJIRA		
	9ppg	10ppg	11ppg
Densidad (ppg)	9	10	11
FV (sg/qt)	61	73.5	78
600 rpm	35	50	45
300 rpm	28	38	33
200 rpm	24	34	29
100 rpm	20	30	25
6 rpm	9	22	17
3 rpm	7	20	15
PV (cP)	7	12	12
YP (lb/100ft ²)	21	26	21
AV (cP)	17.5	25	22.5
Gel 10s (lb/100ft ²)	9	24	15
Gel 10m (lb/100ft ²)	11	28	15
% Agua	99	95	90
% Solidos	1	5	10
% Arena	0.6	2	8
MBT	3	3	3
pH	9	9.6	9.8
Pm	0.5	0.3	0.5
Pf	0.3	0.25	0.25
Cal	0	0	0
Mf	0.25	0.3	0.25
Cl	0.3	0.2	0.25
Dureza total	0.52	0.5	0.52

Fuente: elaboración propia

3.2.1 Cantidad de barita: A continuación, en el **Gráfico 3**, se visualiza la cantidad de barita que es utilizada para las diferentes densidades, esto obtenido por medio de los balances de materia y confirmado por medio de la densidad a la cual se necesita llegar.

Gráfica 2. Cantidad de Barita

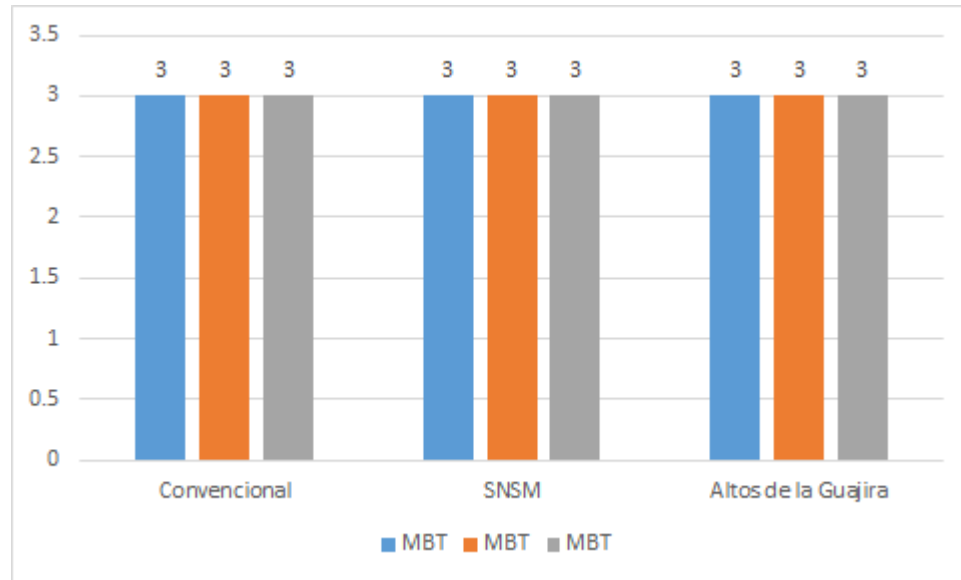


Fuente: elaboración propia

Como se visualiza en la **Gráfica 3** el incremento en material entre la barita convencional y SNSM es de 5.3% para un lodo de 9 ppg, 6.7% para 11 ppg más de barita de la SNSM sobre la convencional, para implementar y llegar al peso deseado; la diferencia de la barita convencional y Altos de la Guajira es del 1.8% (9ppg) al 2.3% (11ppg) más de barita, debido a la gravedad específica del mineral que es la base de densificación del fluido de perforación.

3.2.2 Análisis de prueba MBT: En la **Gráfica 4** se identifica el resultado de la prueba MBT para cada uno de los lodos realizados, se evidencia que no varía debido a que el contenido de arcilla no es alterado a medida que se realizan las pruebas.

Gráfica 3. Resultados MBT

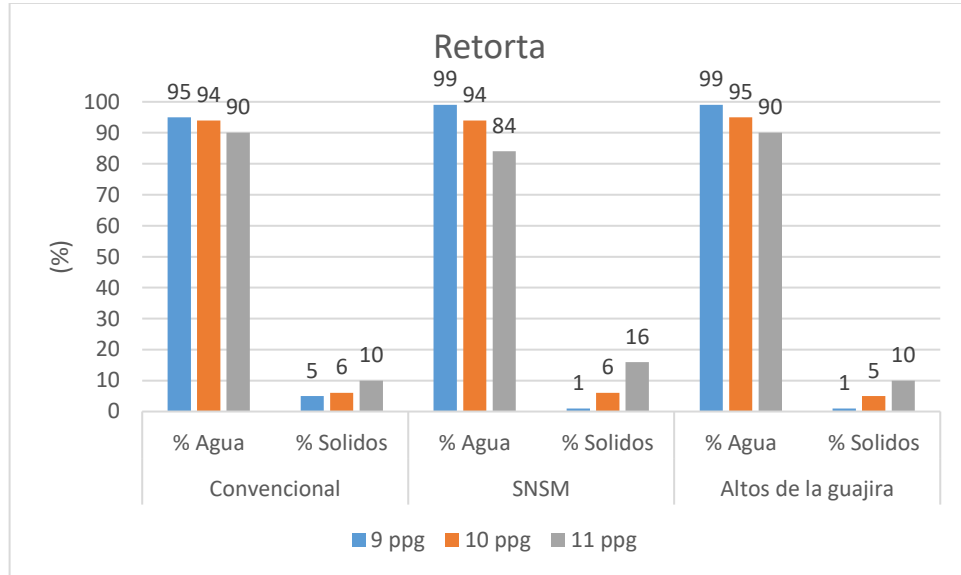


Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta que el único material arcilloso agregado en los lodos hechos en el laboratorio es la Bentonita, se puede concluir que, al no variar las cantidades de esta en los lodos, el resultado que se va a obtener del MBT el cual mide extensión de arcillas en todos los casos será el mismo.

3.2.3 Análisis retorta: En la **Gráfica 5** se identifican los resultados de la retorta para cada uno de los lodos

Gráfica 4. Resultados retorta

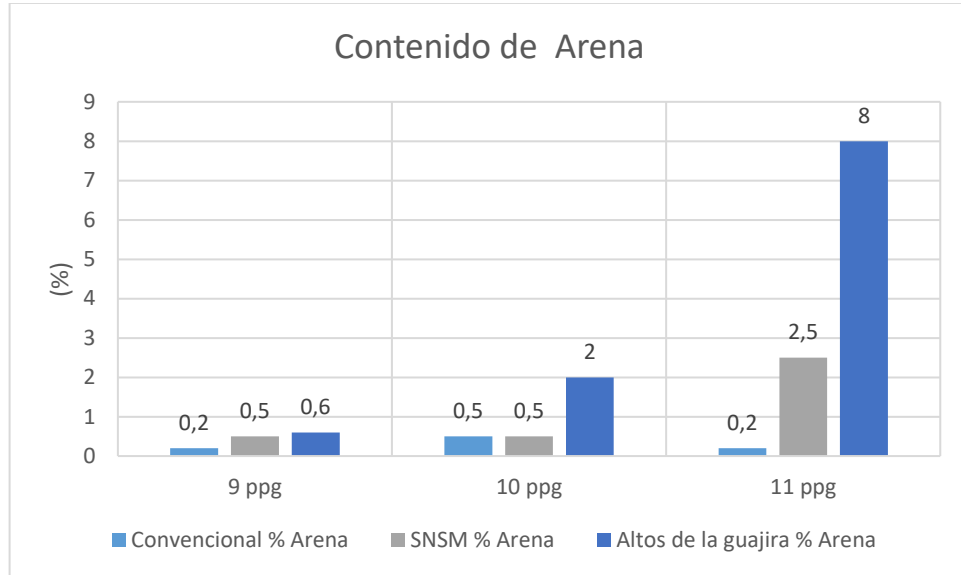


Fuente: elaboración propia. (1,3 y 5: Contenido de agua (%), 2, 4, y 6: Contenido de solidos (%))

En la **Gráfica 5** se denota que hubo una gran similitud en los resultados, presentado una mayor diferencia en la densidad de 11ppg de la barita de la SNSM en donde las otras dieron un % de agua del 90% y en solidos un 10% mientras que esta genero una variación en % de agua del 84% y en solidos del 16%, este puede verse afectada a las altas densidades en esta barita que evidencia un mayor porcentaje de solidos suspendidos.

3.2.4 Análisis contenido de arena: Siguiendo con otras pruebas se procede a revisar el contenido de arena identificado en la **Gráfica 6**

Gráfica 5. Resultados contenidos de arenas

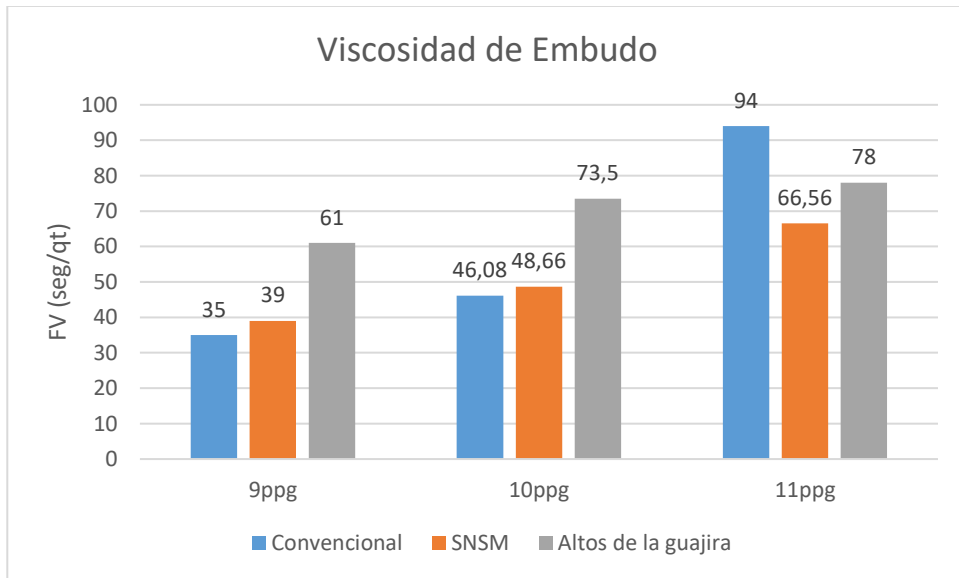


Fuente: elaboración propia.

En este caso lo que se visualiza en la **Gráfica 6** no es el contenido de arenas, esto debido a que no se está perforando ninguna zona, sino es ese porcentaje de sedimentos que se encuentran suspendidos, como se identifica para el lodo convencional en las tres densidades dieron valores bajos, mientras que para la SNSM el único valor fuera de rango es el de la densidad de 10 ppg generando un valor del 2.5, mientras que en el caso de los altos de la guajira si se identifican en dos densidades como lo son en 10ppg y 11ppg obteniendo 2% y 8% respectivamente, esto debido a que quedan muchos solidos suspendidos para la barita de los Altos de la Guajira.

3.2.5 Análisis viscosidad de embudo: En la **Gráfica 7** se identifica la viscosidad de embudo para todas las baritas con todas las densidades establecidas

Gráfica 6. Resultados Viscosidad de Embudo



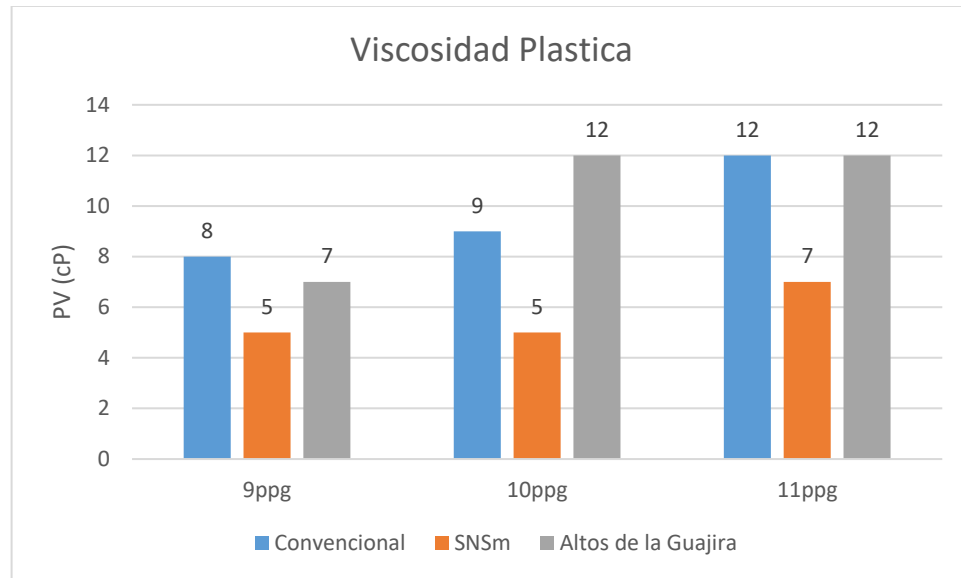
Fuente: elaboración propia.

Como se identifica en la **Gráfica 7**, donde entre la barita convencional, SNSM y Altos de la Guajira muestran un incremento de la viscosidad API con la densidad, como es de esperarse, para los pesos de 9 ppg, 10 ppg y 11 ppg lo cual indica una buena viscosidad embudo, por otro lado como se evidencia una elevación de los resultados de la barita de los altos de la guajira es debido al tamaño de partícula que es más elevada a comparación de las otras baritas. En el momento que se diseña un fluido de perforación se busca que la viscosidad de embudo se encuentre en el valor más bajo dentro del rango operativo porque indica una buena eficiencia de remoción de los recortes presentes en el hueco y una baja cantidad de sólidos en el lodo, esto es típico para un fluido tipo Bingham.

Se observa un valor anómalo para la barita Fox a 11 ppg (el doble del valor a 10 ppg), que contrasta con el incremento de viscosidad de la barita AG que es de apenas el 6%. Este valor se considera un “outlier”, o valor anómalo debido a algún factor no determinado durante el ensayo.

3.2.6 Análisis reología: En la **Gráfica 8** vemos reflejados los resultados de la viscosidad plástica, punto cedente y viscosidad aparente.

Gráfica 7. Viscosidad plástica.



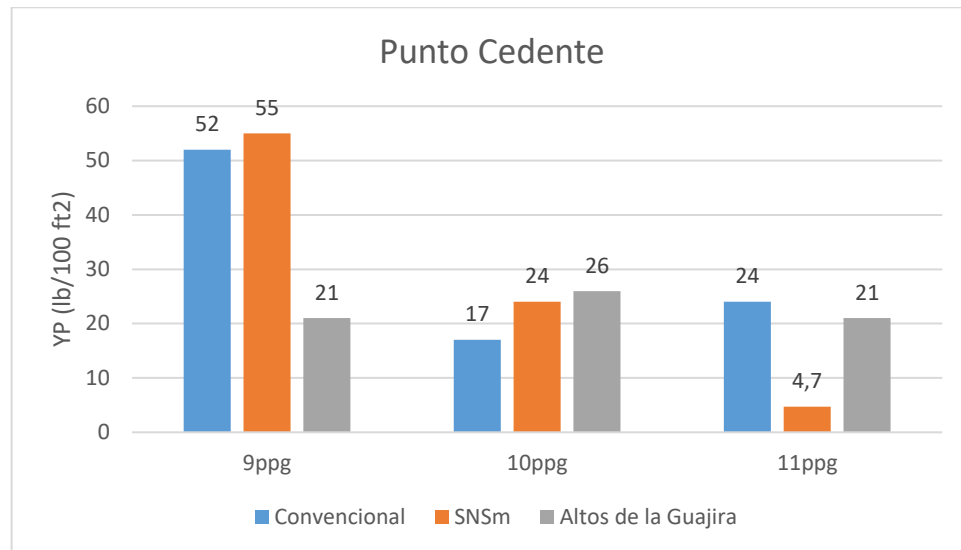
Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 8** muestra los resultados de Viscosidad Plástica (en cP) a las diferentes densidades con respecto a la fricción de sólidos en el lodo, se tiene que el aumento del valor de la viscosidad plástica es un indicativo de una mayor resistencia al flujo causado por fricción mecánica a medida que aumenta la concentración de sólidos.

Se analiza que el mejor resultado se encuentra en la variación reológica de la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta debido a que su viscosidad plástica es la menor en todos los pesos a los que se somete la prueba, lo cual indica que la barita que se extrae en el Magdalena tiene baja probabilidad de presentar problemas frente a la acumulación de sólidos extrafinos a medida que se corre en el hoyo, por otra parte los valores de 5cP son debidos a desviaciones por aditivos no adecuados como el poli acrilato de sodio en esta formulación.

A continuación se analiza el Punto cedente (Yield point) el cual es una indicación del esfuerzo mínimo de corte que se debe aplicar para que empiece a fluir el fluido de perforación. Este valor se correlaciona con la capacidad de transporte del fluido de perforación.

Gráfica 8. Punto cedente



Fuente: elaboración propia

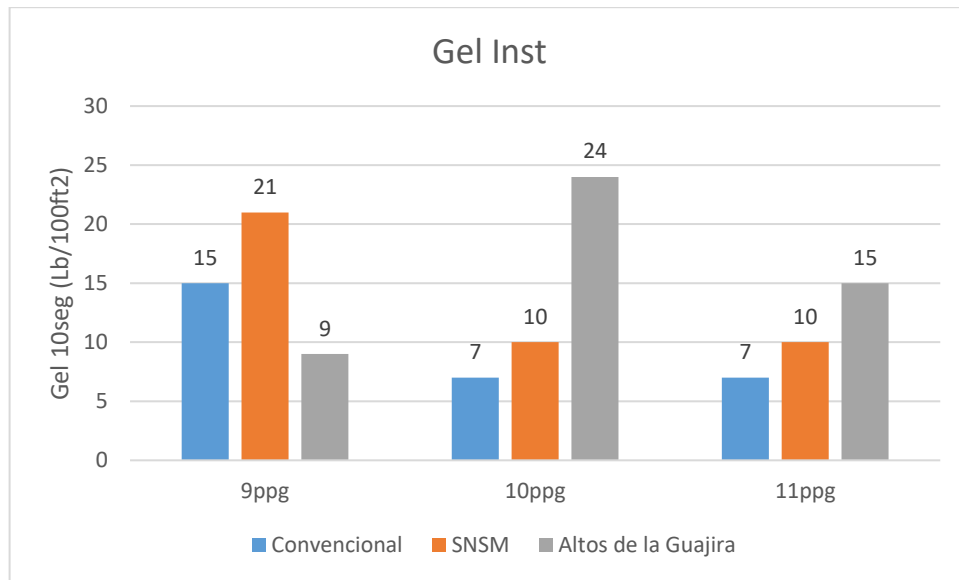
En la **Gráfica 9** se identifica que un mayor valor de punto cedente indica que tiene alta probabilidad de generar atracción eléctrica entre las partículas arcillosas del lodo y la formación en la que se va a correr el lodo. Los resultados en las densidades de 10ppg y 11ppg van acorde a un rango en el cual debe mantenerse, esto debido a la formulación del lodo por parte de la bentonita y el poliacrilato de sodio que afecta directamente esta prueba. El valor de 4.7 para el lodo de AG 11ppg es inusualmente bajo y no es representativo de la prueba.

En cuanto al lodo de 9ppg para la barita convencional y SNSM los valores son extremadamente altos y anómalos, se plantea la hipótesis que es debido al por el poliacrilato de sodio utilizado al no tener una buena mezcla con el lodo, cabe resaltar que esta prueba no mide una correlación uno a uno, pues la prueba se ve afectada por el porcentaje de finos que contiene la barita; tal como se observa en el Anexo C “Ficha técnica Barita Convencional”, el porcentaje que pasa tamiz 400 es casi 3%, lo cual da un contenido de finos excesivamente alto que va a contribuir en el resultado.

Los resultados de esta prueba no pueden ser considerados concluyentes para comparar la calidad de una mezcla u otra.

En la **Gráfica 10** se representan los resultados obtenidos de las tres baritas para el gel de 10 segundos.

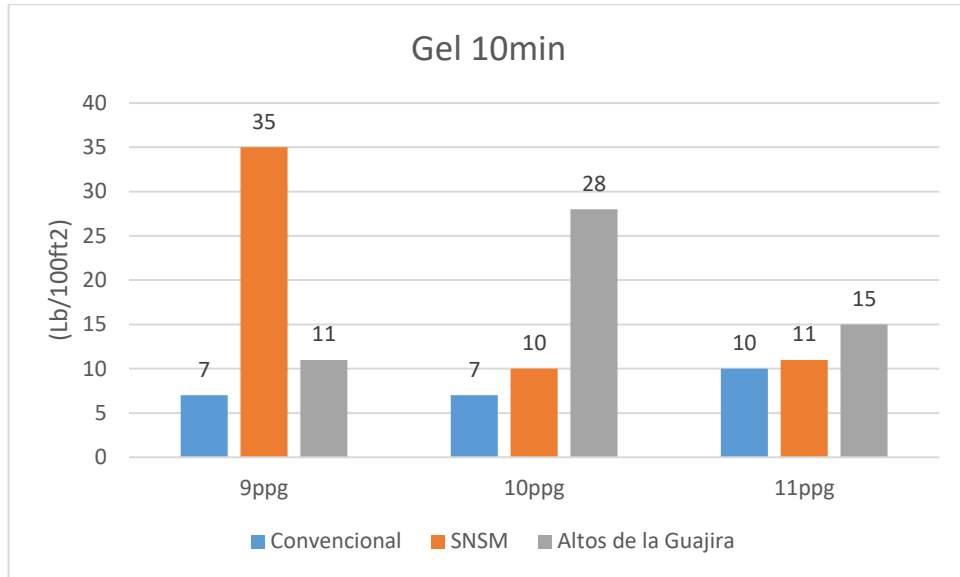
Gráfica 9. Gel 10 segundos



Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la **Gráfica 10** hay una relación entre la barita convencional y la barita de la SNSM, mientras que la barita de los altos de la Guajira presenta una variación extraña con alta probabilidad de que se vea afectado por el tamaño de la partícula de la barita, esto podría deberse a las diferentes en el material pasa malla 200 con respecto al material pasa 400 mesh que es la indicada.

Gráfica 10. Gel 10 minutos



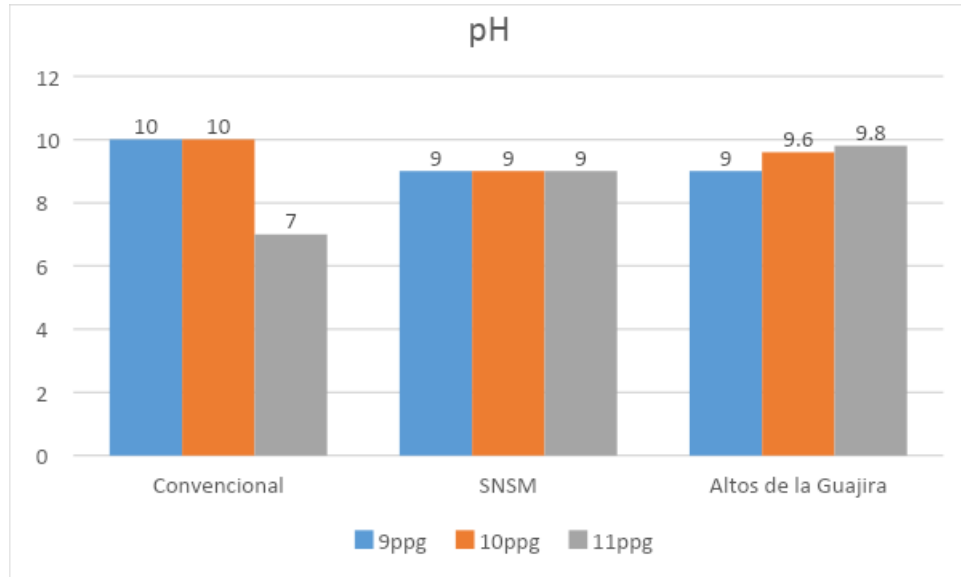
Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 11** se presenta la misma inconsistencia mencionada en la **Gráfica 10** para la barita de los altos de la Guajira, además una variación muy marcada para la densidad de 9ppg de la SNSM esto debido a un posible error humano.

No obstante, si se descarta el valor anómalo de SNSM para 9 ppg y el de AG para 10 ppg se observa un incremento monótono en el valor de velocidad de corte después de un tiempo de reposo de 10 minutos, como es de esperarse y sin que se pueda concluir que este parámetro es preponderado.

3.2.7 Análisis pH: En la **Grafica 12** se identifica los resultados del pH para cada una de los lodos.

Gráfica 11. pH



Fuente: elaboración propia.

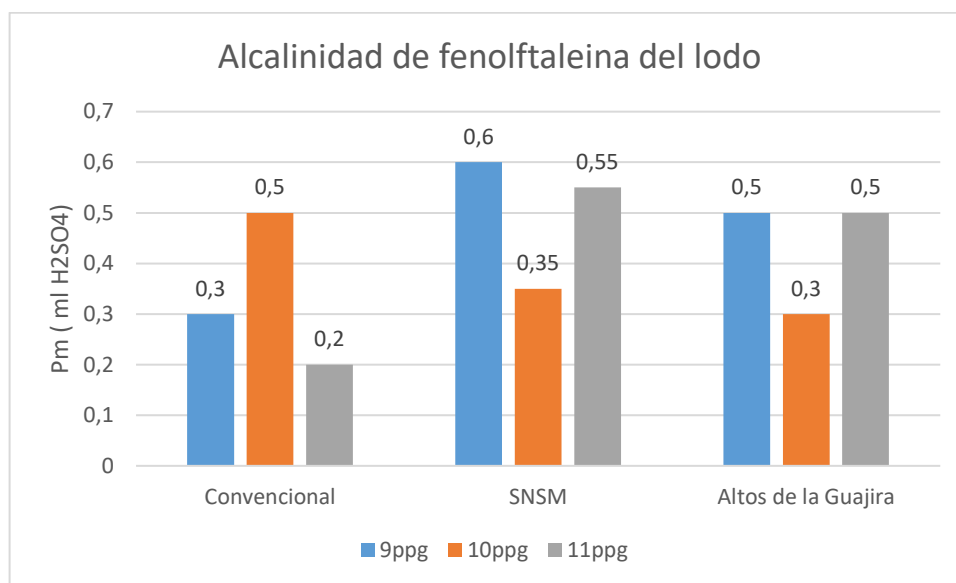
En la **Gráfica 12** se evidencia una estabilidad en el pH de la SNSM con un resultado entre 9 a 10, siendo un pH alcalino típico lo cual va a evitar corrosión y el debido funcionamiento de los aditivos adicionados al lodo; en general el pH se comporta de forma alcalina lo cual indica que en cualquiera de los tres casos de barita el pH no es una propiedad la cual requiera de alguna atención en especial, sin embargo para la barita convencional a 11 ppg se da un resultado de un pH neutro, que es anormal, lo cual podría ser a causa de un fallo en la lectura, si el pH es muy bajo, los almidones se descomponen en la mezcla.

3.3 ANÁLISIS PRUEBAS QUÍMICAS

Se presentan los resultados obtenidos en las pruebas químicas básicas del laboratorio de lodos.

3.3.1 Análisis Pm: A continuación, en la **Gráfica 13** se presentan los resultados de la prueba de alcalinidad del lodo

Gráfica 12. Prueba Química, Pm.

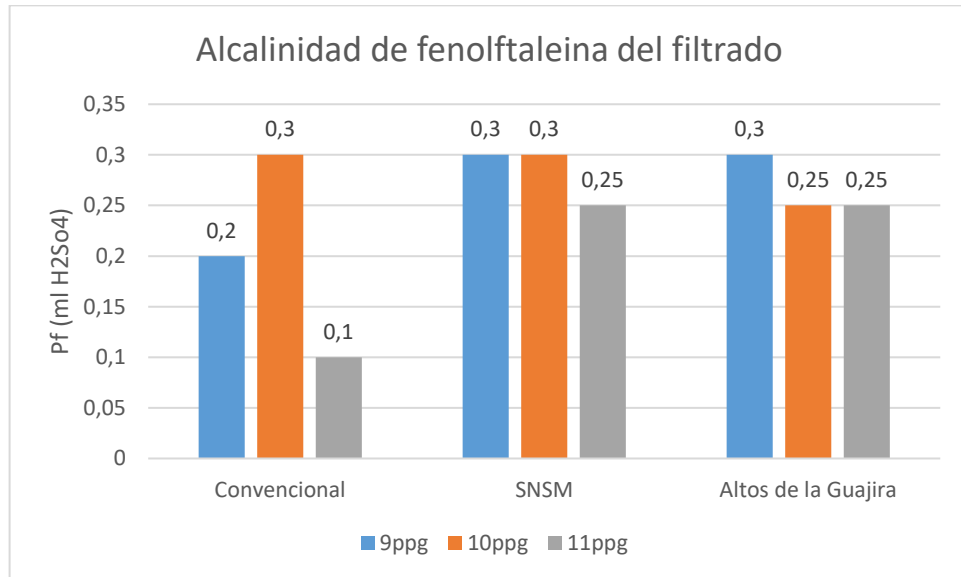


Fuente: elaboración propia.

La **Gráfica 13** evidencia una alta cantidad de iones solubles e insolubles para el lodo de la SNSM a una densidad de 9ppg con un valor de 0.6, lo que indica que tiene alta cantidad de hidróxidos por ende gran alcalinidad, esto sucede en cada uno de los pesos debido a la alcalinidad estable que tiene el lodo preparado con la barita de la SNSM.

3.3.2 Análisis Pf: En la **Gráfica 14** se visualizan los resultados de la prueba Pf de cada lodo.

Gráfica 13. Prueba Química, Pf.

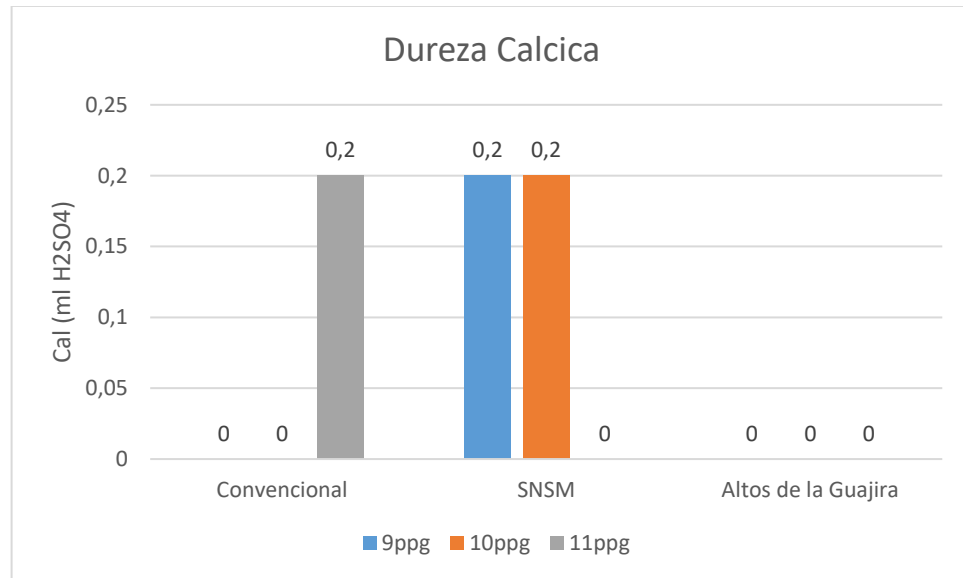


Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 14** se identifican las medidas de los iones solubles en el filtrado, que del mismo modo al ser las 3 baritas implementadas en el presente trabajo de grado alcalino, lo que indica directamente las cantidades de hidróxidos presentes en el filtrado

3.3.3 Análisis calcio: En la **Gráfica 15** se presentan los resultados de la prueba ya mencionada

Gráfica 14. Prueba Química, cal.

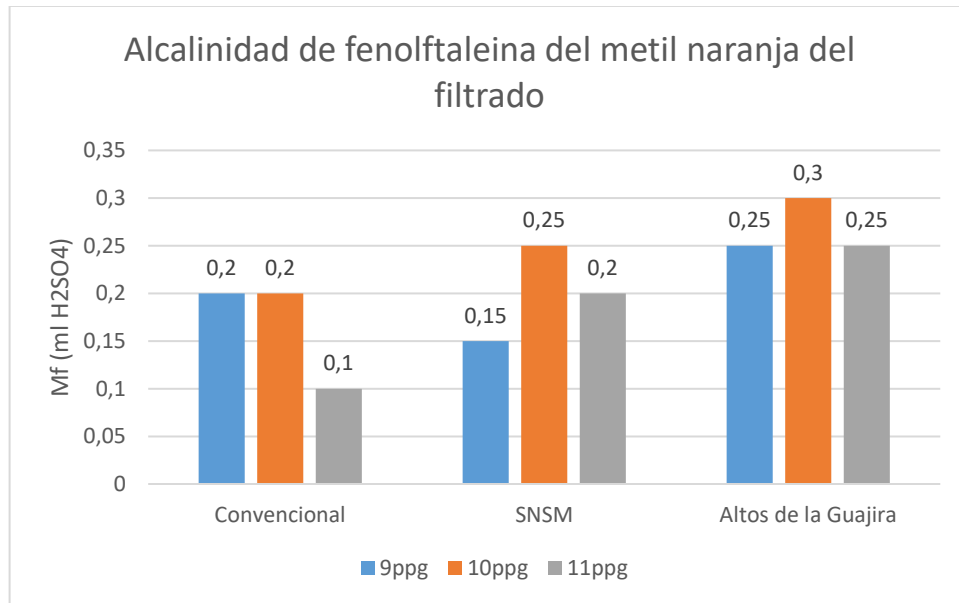


Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 15** se identifican los resultados de la dureza cálcica, en la barita convencional con la densidad de 11ppg es posible que haya un error en la prueba, de la misma forma en la barita de la SNSM para la densidad de 11ppg, además teniendo en cuenta la Grafica 2 debería generar un valor diferente a cero, por lo tanto el valor de Cal no se analiza aquí como punto de comparación.

3.3.4 Análisis Mf: En la **Gráfica 16** muestra los respectivos resultados de la prueba mf para cada lodo

Gráfica 15. Prueba Química, mf.

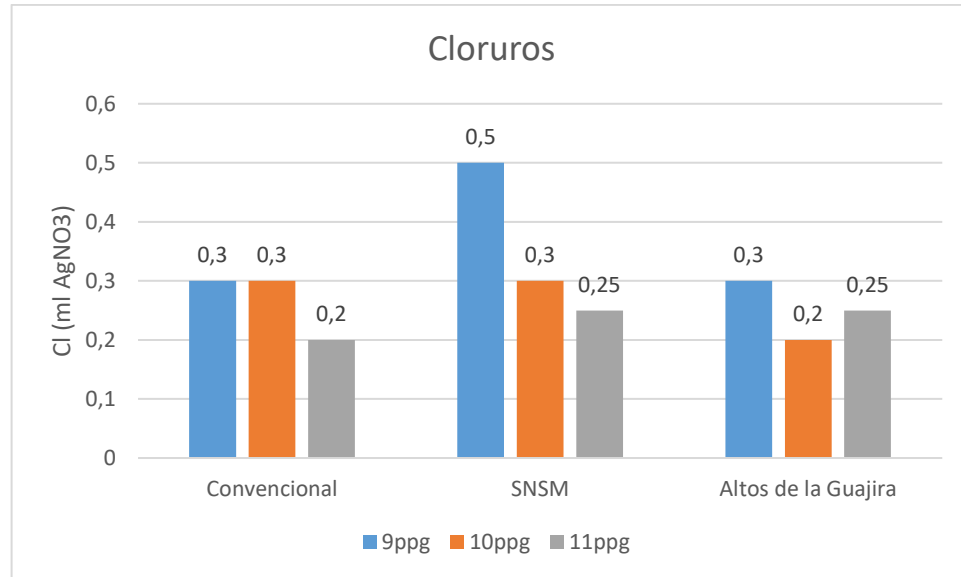


Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 16** se denotan valores elevados muy similares al del pf lo cual nos brinda un indicio de que los iones hidroxilos son los principales contribuyentes de alcalinidad en cada uno de los lodos.

3.3.5 Análisis cloruros: los resultados de la prueba se encuentran en la **Gráfica 17**

Gráfica 16. Prueba Química, Cl.

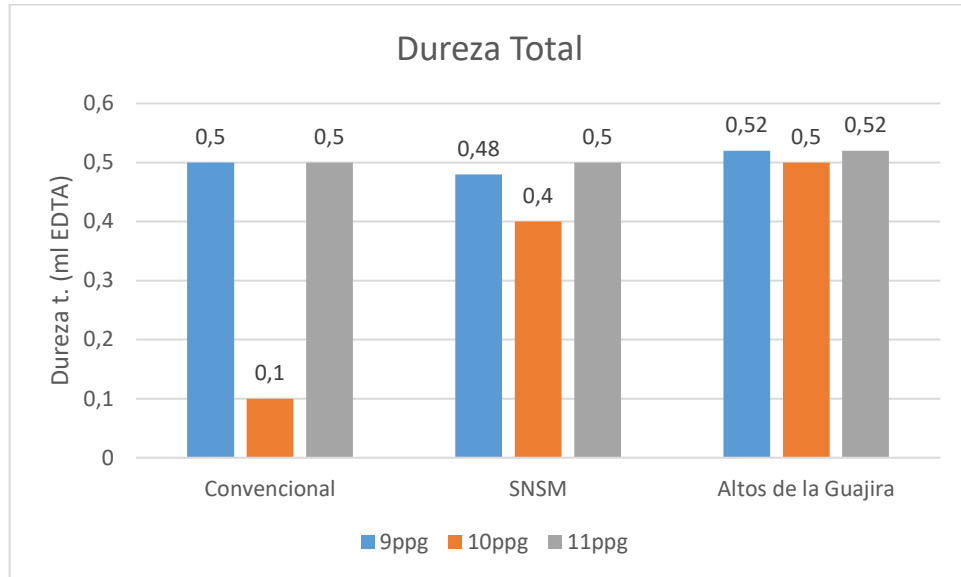


Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 17** estos resultados se deben tener en cuenta para los parámetros del lodo, debido a que en perforación si se presenta una variación de alguno de estos es debido a que se presente una interacción con una formación salina.

3.3.6 Análisis dureza total: los resultados de la prueba dureza total son visualizados en la **Grafica 18**.

Gráfica 17. Prueba Química, Dureza T.



Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfica 18** indican los resultados de la dureza total, en el caso de la barita convencional en la densidad de 10ppg lo más probable es que se haya hecho una lectura incorrecta, por otro lado, son valores acordes teniendo en cuenta las cantidades de calcio y magnesio presentes en el mineral utilizado en cada uno de los lodos.

Para cerrar con este capítulo del análisis en el desempeño del mineral barita de la SNSM y Altos de la Guajira en un fluido de perforación base agua, es de suma importancia precisar si dicha evaluación que se implementó, brindaron resultados positivos o negativos, por lo cual, apoyándonos en la **Tabla 11** y los análisis presentados anteriormente, se evidencia un mejor rendimiento en el lodo de la SNSM en comparación con el lodo de la barita Convencional (Fox BB White), presentando un aumento del 13.8% en las diferentes pruebas sometidas, por otro lado, para el fluido de perforación con la barita de los Altos de la Guajira refleja un aumento del 11.15%, dando por entendido que las baritas estudiadas en el presente trabajo de grado son aptas para el uso como densificante en un lodo de perforación base agua.

Tabla 11. Resultados

PROPIEDADES	CONVENCIONAL			SNSM			ALTOS DE LA GUAJIRA		
	9ppg	10ppg	11ppg	9ppg	10ppg	11ppg	9ppg	10ppg	11ppg
Densidad (ppg)	9	10	11	9	10	11	9	10	11
FV (sg/qt)	35	46.08	94	39	48.66	66.56	61	73.5	69.28
600 rpm	68	35	48	65	34	40	35	50	45
300 rpm	60	26	36	60	29	33	28	38	33
200 rpm	56	21	29	55	25	29	24	34	29
100 rpm	49	18	23	48	22	26	20	30	25
6 rpm	25	9	12	33	14	12	9	22	17
3 rpm	19	7	7	21	12	9	7	20	15
PV (cP)	18	9	12	5	5	7	7	12	12
YP (lb/100ft ²)	42	17	24	55	24	4.7	21	26	21
AV (cP)	39	17.5	24	32.5	17	20	17.5	25	22.5
Gel 10s (lb/100ft ²)	15	7	7	21	10	10	9	24	15
Gel 10m (lb/100ft ²)	7	7	10	35	10	11	11	28	15
% Agua	95	94	90	99	94	84	99	95	90
% Solidos	5	6	10	1	6	16	1	5	10
% Arena	0.2	0.5	0.2	0.5	0.5	2.5	0.6	2	8
MBT	3	3	3	3	3	3	3	3	3
pH	10	10	7	9	9	9	9	9.6	9.8
Pm	0.3	0.5	0.2	0.6	0.35	0.55	0.5	0.3	0.5
Pf	0.2	0.3	0.1	0.3	0.3	0.25	0.3	0.25	0.25
Cal	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0
Mf	0.2	0.2	0.1	0.15	0.25	0.2	0.25	0.3	0.25
Cl	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3	0.25	0.3	0.2	0.25
Dureza total	0.5	0.1	0.5	0.48	0.4	0.5	0.52	0.5	0.52

Fuente: elaboración propia

3.4 ANÁLISIS FINANCIERO

Para realizar un debido análisis financiero en este proyecto de grado se tendrá en cuenta el estudio de tres casos. Donde el primer caso será el de las prestadoras de servicios en base de información recopilada en trabajos de grado, el segundo con barita commodity y el tercer caso será el estudio de la barita recolectada en la Sierra Nevada de Santa Marta y en Los Altos de la Guajira teniendo en cuenta que la cadena de suministro como producción, almacenaje y transporte se incluye en los cálculos y resultados, para así terminar el análisis con una comparación de los valores arrojados por cada estudio. Para este trabajo de grado se utiliza una tasa de cambio de 3736 COP por cada Dólar.

3.4.1 Caso 1 empresas prestadoras de servicios. Precio por saco en dólares del año 2019 más la aplicación del IPC del año 2020. Para mantener homogeneidad entre los cálculos se toma el caso del campo Castilla para el cual se estiman 5000 sacos de barita por pozo promedio, (información facilitada por la ACIPET), **Tabla 12.**

Tabla 12. Empresas prestadoras de servicios

# Empresa	Empresa	Costo por saco (USD)	IPC 2020 (3,57%)	5000 sacos (USD)
1	BAKER	12,87	13,33	66647,30
2	QMAX	12,90	13,36	66802,65
3	HALLIBURTON	13,00	13,46	67320,50
4	SCHLUMBERGER	12,83	13,29	66440,16
	PROMEDIO	12,90	13,36	66802,65

Fuente: DOMÍNGUEZ, C & SUAREZ, N.(2019). EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA Y COSTOS DE LA BARITA IMPORTADA DE PERÚ RESPECTO A LA NACIONAL COMO DENSIFICANTE EN LAPERFORACIÓN DE UN BLOQUE EN CAMPO CASTILLA (tesis de pregrado). Fundación Universidad de América, Bogotá Colombia. P102

Estos precios en dólares simbolizan lo que mensualmente las empresas petroleras pagan en un campo de perforación. Los costos de este mineral al año corresponden a 2.88 mil millones de pesos colombianos aproximadamente por pozo, esta cifra corresponde a la multiplicación del promedio de los 5000 sacos y la tasa de cambio de USD a COP. Teniendo en cuenta que la barita que estas empresas venden es importada de países como China, India, Perú entre otros.

3.4.2 Caso 2 de Barita como commodity. La barita como commodity es el material de más fácil acceso, donde los volúmenes por pedido son menores y de mayor

economía con respecto a los prestadores de servicio, la cual incluye la cadena de suministro de producción, transporte y almacenaje. **Tabla 13.**

Tabla 13. Barita como commodity

# Empresa	Precio/TON (COP)	Precio/Kg (COP)	Precio/saco (50 kg) (COP)	Precio/saco (USD)	5000 sacos (USD)
1	553000	553	27650	7,40	36985,02
2	500000	500	25000	6,69	33440,34
3	465000	465	23250	6,22	31099,52
4	440000	440	22000	5,89	29427,50
PROMEDIO				6,55	32738,10

Fuente: OÑATE, A. Ing de minas. Observación inédita, 29 de Junio, 2020 Ciénaga, Magdalena

La reducción en el costo de la barita como commodity anual es 1.4 mil millones de pesos colombianos esta cifra corresponde a la multiplicación del promedio de los 5000 sacos y la tasa de cambio de USD a COP, lo cual permite deducir que la compra de barita de marca genérica disminuye en un 50% el presupuesto aplicado para adquirir un bulto de barita con una prestadora de servicios.

3.4.3 Caso 3 barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y Altos de la Guajira. La barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y Altos de la Guajira tiene la característica de ser totalmente artesanal, lo que quiere decir, que las minas de donde es extraída no cuentan con una cadena de suministro. Por ende, para entregar una barita lista para ser implementada en lodos de perforación se debe tener en cuenta además del costo del material, los valores del transporte y la molienda.

Precio en pesos colombianos y en dólares por saco de 50 kg, **Tabla 14.**

Tabla 14. Precio barita SNSM y Altos de guajira

Sacos (50 kg)	Costo (COP/SACO)	Costo (3736) (USD/SACO)
1	5000	1,34

Fuente: OÑATE, A. Ing de minas. Observación inédita, 4 de Febrero, 2020 Ciénaga, Magdalena

Teniendo en cuenta el transporte de la mina al municipio más cercano (Uribia, Aracataca) y que de allí se envía un cargamento de 64 TON a Ciénaga Magdalena, el vehículo en el cual se va a transportar el mineral hace parte del proceso de suministro que se incluye en el valor final. Se evidencia el costo por viaje de una volqueta sencilla la cual es necesaria para el transporte de la mina al municipio

debido a que estas rutas son de difícil acceso, así como el valor de la mula por viaje que será del municipio a Ciénaga. **Tabla 15.**

Tabla 15. Tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Capacidad (TON)	Sacos (50kg)	Valor (COP)	Viajes	Valor(COP)
SENCILLA	11	220	750000	3	2250000
Mula doble troque	34	680	1200000	1	1200000
				SUM A	3450000

Fuente: SOTO, C. Observación inédita, 29 de Junio, 2020. Aracataca Magdalena

Quiere decir que transportar un saco de barita tiene un valor de 5,073.53 COP o 1,37 USD.

Para finalizar con la línea de producción se tiene en cuenta la molienda del mineral, para cumplir con los estándares de una barita para implementar en lodos de perforación. Con un molino con capacidad de moler 20 sacos de 50 kg por día a un valor de 110,000 pesos colombiano por tonelada **Tabla 16.**

Tabla 16. Molienda barita

Costo saco (COP)	Costo saco (USD)	5000 sacos (USD)
5500	1,471162539	7355.81

Fuente: ESCUDERO, A. Observación Inédita, 29 de Junio, 2020. Ciénaga Magdalena

Para finalizar, se llega a un total de cuanto saldría el saco de 50 kg incluyendo transporte y molienda, además de empaquetado, **Ecuación 6.**

Ecuación 6. Total barita del proyecto

$$TOTAL(USD) = Ps + Ts + Ms$$

Fuente: elaboración propia

Donde:

- Ps: Precio por saco
- Ts: Precio del transporte por saco
- Ms: Precio molienda por saco

$$\text{Total (USD)} = 1,34 + 1,37 + 1,47 = 4,17 \text{ USD}$$

Cálculo de los 5000 sacos de referencia con el valor de 4.17 USD de la barita de la SNSM y Altos de la Guajira **Tabla 17.**

Tabla 17. Precio final barita

PRECIO SACO (USD)	PRECIO 5000 SACOS (USD)
4.17	20,850

Fuente: elaboración propia

Para este análisis se tuvo en cuenta la cadena de suministro que es producción, transporte y almacenaje con valores del año 2020, de esta manera evidenciar una aproximación del costo a la cual sería comercializada la barita de la SNSM y Altos de la Guajira. El valor por año de los sacos requeridos es de 900 millones de pesos colombianos, lo cual indicaría una reducción del 68.78% con respecto a la venta por las empresas prestadoras de servicios y un 36.31% de acuerdo con el valor de la barita como commodity, es así como se concluye que la barita que en este trabajo de grado se está analizando no solo se comporta de igual o mejor manera que las convencionales, si no también, el valor de comercialización siendo 4.17 USD por saco, el cual incrementa las ganancias a generar en un campo petrolero común.

3.4.4 Análisis y comparación de resultados: Comparación de precio de la barita en dólares en los tres casos de estudio **Tabla 18.**

Tabla 18. Comparación precios barita

BARITA	PRECIO SACO (USD)	PRECIO 5000 SACOS (USD)
Prestadoras de servicios	13,36	66,802
Commodities	6,55	32,738
SNSM y AG	4,17	20,850

Fuente: elaboración propia

La barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y altos de la guajira muestra ser un 52,6% más barata en referencia con la suministrada por las empresas prestadoras de servicios y la barita al detal (commodities), este valor se muestra en dólares.

Si en promedio por campo en Colombia se implementan 5000 sacos de barita por pozo y por mes, la disminución del precio es en promedio de 28,920 USD, llevándolo a una escala de un año el ahorro sería de 347,043 USD en cada uno de los campos operados en Colombia por la empresa Ecopetrol.

En una proyección hasta el 2025 Ecopetrol perforará 2500 pozos, es decir, 12'500.000 sacos de barita con un valor de 52 millones USD de barita de la SNSM y Altos de la Guajira, si se compara con los 167 millones USD que valdría la barita con una empresa prestadora de servicios es una disminución del 68,86% al cabo de los 5 años.

3.3.5 Relación costo-beneficio: La relación costo-beneficio representa la ganancia obtenida al terminar el proyecto; dentro de estas ganancias se deben tener en cuenta cada uno de los egresos que se tuvieron a lo largo del proyecto, **Ecuación 5**.

Para el proyecto presente los costos se dan a lo largo de la línea de suministro, es decir, producción, transporte y molienda, así como los beneficios que se representan en el valor final al cual se va a vender el servicio o bien que se va a prestar. Para la proyección de 2500 pozos donde se usan 12'500.000 sacos por cada pozo en los 5 años, **Tabla 19**.

Tabla 19. Precio por 12'500.000 sacos

BARITA	PRECIO SACO (USD)	PRECIO (SACOS)(5AÑOS) (MMUSD)
Prestadoras de servicios	13.36	167
Commodities	6.55	81
SNSM y AG	4.17	52

Fuente: elaboración propia

En relación con la **Ecuación 5** y la **Tabla 18**, la reducción de gastos en promedio de las prestadoras de servicios y commodities es de 115 millones USD y de 45 millones USD respectivamente, es decir, representan las ganancias o beneficios que tendría la comercialización de la barita de la SNSM y Altos de la Guajira el promedio de esta cifra es de 80 millones USD.

$$RBC(PS) = \frac{80000000}{167000000} = 0.48$$

$$RBC(C) = \frac{80000000}{97000000} = 0.82$$

$$RBC(SNSM \& AG) = \frac{80000000}{52000000} = 1.53$$

En el análisis el mayor valor se encuentra en la barita que se extrae de la Sierra Nevada de Santa Marta, dado que el beneficio de su venta es del 53% mejor que de las prestadoras de servicios y de la barita como commodity. Mientras los otros dos casos muestran que los costos son mayores a los beneficios, puesto que los beneficios para las prestadoras de servicios y commodities se reducen en un 53% y 18% respectivamente esto con base a una proyección de 5 años.

4. CONCLUSIONES

- Una de las principales características del mineral evaluado fue la densidad. Existe una variación con respecto a la densidad entre la barita convencional White FOX (densidad de 3.7 g/cc), y las baritas de la SNSM y los Altos de la Guajira, las cuales presentan una disminución del 10% y del 4% respectivamente. Ninguna de las 3 muestras analizadas cumple con los estándares de la Norma API 13-A para barita en lodos de perforación.
- La diferencia de los porcentajes de Bario que se obtienen en las pruebas químicas del mineral no es de relevancia a la hora de realizar lodos de perforación, debido a que se evidencia que la cantidad de barita necesaria en los 9 lodos es similar. Siendo un aumento de 5,33% y 2,1% para el gramaje de las pruebas realizadas con la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y de los Altos de la Guajira y respectivamente, con base a la cantidad de barita usada en los lodos preparados con barita convencional en las diferentes densidades.
- Se reduce en un 4,8% el pH lo que brinda una alcalinidad estable a lo largo de su fluidez en el pozo, disminuye en un 18,1% los esfuerzos requeridos para movilizar el fluido de perforación, la diferencia entre las medidas de los geles son tan solo 4 Lb/ 100 ft² lo cual indica poca acumulación de sólidos ultra finos. Estos resultados definen que las baritas recolectadas en la SNSM y Altos de la Guajira cumple con los estándares para implementar en lodos de perforación poliméricos base agua.
- El aumento del rendimiento es de 13,8% por parte de la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y 11,15% para la barita de los Altos de la Guajira, con respecto a la barita que se implementa normalmente. Esto indica un mejor desempeño en las diferentes pruebas a las que fueron sometidas lo cual se evidencia en los resultados y sus respectivos análisis, para dar un aval de que las baritas recolectadas son aptas para la implementación en lodos de perforación base agua.
- La implementación de la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y lo Altos de la Guajira reduce en un 68,79% el precio por el cual se pagaría en la proyección de 5 años para los pozos manejados por Ecopetrol, lo cual indica un ahorro del más del 50% de acuerdo con las empresas prestadoras de servicios por cada mes en operación. El mayor costo beneficio resulta ser para la barita de la Sierra Nevada de Santa Marta y los Altos de la Guajira debido a una reducción de costos en la cadena de suministro del mineral extraído directamente de una mina que es resguardada por comunidades indígenas, esto reduce los costos que este

proyecto pueda tener y aumenta en un 53% los beneficios al vender el producto final.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar el desempeño de la barita de la SNSM y los Altos de la Guajira con una formulación implementada en algún pozo de Colombia.
- Se recomienda realizar un perfil mineralógico completo en cada una de las baritas estudiadas, de esta manera profundizar en las impurezas existentes en cada una.
- Tener en cuenta, la tasa de retorno energético, el carácter no renovable del mineral Barita, los posibles cambios socioeconómicos generados por la explotación, la capacidad de la formación de producir el mineral y el impacto ambiental.
- Debido a las interacciones químicas del polímero se recomienda el reconocimiento de las propiedades fisicoquímicas del poliacrilato de Sodio, de esta manera evitar resultados incongruentes en las pruebas realizadas al lodo.
- Estudio de la barita de la SNSM y los Altos de la Guajira a condiciones de HTHP, con el fin de evaluar su desempeño a condiciones diferentes a la estándar.
- Se recomienda utilizar la barita de la SNSM o Altos de la Guajira en la perforación de alguna sección para ver el comportamiento a diferente presión y temperatura, además de conocer su reacción con la formación.
- Para evitar pérdidas del material recolectado se aconseja adquirir el mineral previamente molido.
- Para obtener datos más precisos se recomienda repetir dos veces las pruebas en cada uno de los lodos preparados.

BIBLIOGRAFIA

BAYONA German, LAMUN Felipe, CARDONA Agustín, JARAMILLO Carlos, MONTES Camilo y TCHEGLIAKOVA Nadejda (2007). PROCESOS OROGÉNICOS DEL PALEOCENO PARA LA CUENCA RANCHERÍA (GUAJIRA, COLOMBIA) Y ÁREAS ADYACENTES DEFINIDOS POR ANÁLISIS DE PROCEDENCIA, Universidad Nacional de Colombia, Facultad Ciencias. Geología Colombiana, Volumen 32, p. 21-46, ISSN electrónico 2357-3767. ISSN impreso 0072-0992.

CERQUERA ARAÚJO, A., RODRÍGUEZ MACHADO, C. A. & RUANO FONSECA, D. F. (2017). ANÁLISIS MINERALÓGICO, QUÍMICO Y POROSIMÉTRICO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS DE UNA CANTERA PERTENECIENTE A LA FORMACIÓN GEOLÓGICA DE LA SABANA EN EL MUNICIPIO DE SOACHA - CUNDINAMARCA. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Especialización en Ingeniería de Pavimentos. Bogotá, Colombia

DOMÍNGUEZ CAMARGO, C. A. y SUÁREZ NIÑO, N. (2019) EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA Y COSTOS DE LA BARITA IMPORTADA DE PERÚ RESPECTO A LA NACIONAL COMO DENSIFICANTE EN LA PERFORACIÓN DE UN BLOQUE EN CAMPO CASTILLA. Trabajo de grado. Fundación Universidad de América. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7656>

Energy API. (2001). MANUAL DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN procedimiento estándar para las pruebas de fluidos de perforación. Dallas, Texas recuperado de https://www.academia.edu/33533726/MANUAL_DE_FLUIDOS_DE_PERFORACION_-_API.pdf

GÓMEZ PLATA Cristhian Nicolás, Bogotá, (2017), ESTRATIGRAFÍA Y ANÁLISIS DE PROVENIENCIA DE LA FORMACION LOS INDIOS, Y SU RELACIÓN CON LA EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA (COLOMBIA). Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/59835/1/1019081140.2017.pdf>

IDÁRRAGA-GARCÍA Javier, POSADA Blanca y GUZMÁN Georgina, Santa Marta, (2011), GEOMORFOLOGÍA DE LA ZONA COSTERA ADYACENTE AL PIAMONTE OCCIDENTAL DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA ENTRE LOS SECTORES DE POZOS COLORADOS Y EL RÍO CÓRDOBA, CARIBE COLOMBIANO, Boletín de investigaciones marinas y costeras, 40 (1), p. 41-58

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

LOPEZ J. Danny D. (2011). MUCHO MÁS QUE CARBÓN. La Guajira, Colombia.



LOZANO Marcela y ROXANA Santiago, México, (2011), CONTROL DE CALIDAD DE ADITIVOS EMPLEADOS EN LA PREPARACION DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN, trabajo de grado. la Universidad Veracruzana. Recuperado de <https://www.scribd.com/doc/221956811/TESIS1-Fluidos-de-Perforacion>

ANEXOS

ANEXO A

CERTIFICADOS EXTRACCIÓN BARITA

Sierra Nevada de Santa Marta

	REPÚBLICA DE COLOMBIA DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA ALCALDÍA DE URIBIA NIT. 892.115.155-4 CAPITAL INDÍGENA DE COLOMBIA		
	CÓDIGO: 892.05.25.01 INFORME DE GESTIÓN SEPTIMO INFORME	VERSIÓN: 2013 SECRETARÍA DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y MEDIO AMBIENTE	

Febrero 05 2020.

LA SUSCRITA LA SECRETARIA DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y MEDIO AMBIENTE DE LA ALCALDÍA MUNICIPAL DE URIBÍA

Asunto: inspección, muestro área minera BARITA.

La Secretaria De Desarrollo Productivo Y Medio Ambiente de La alcaldía Municipal de Uribí hace constar que Los ingenieros de petróleos DANIELA AMAYA COSTES Y FRANCISCO JAVIER GUTIÉRREZ SÁNCHEZ viajaron el día 5 de Febrero del 2020 al municipio de Uribí para emprender un recorrido con el objetivo de realizar un muestreo, inspección, recolección y transporte del mineral BARITA bajo las normas de seguridad y de explotación de los recursos naturales. **Ley 685 2001 código de minas.**

En acompañamientos del funcionario de la alcaldía municipal de Uribí el ingeniero de minas ÁLVARO JESUS OÑATE HERNANDEZ se realizó la recolección y transporte del mineral BARITA encontrada en los diferentes yacimientos del mineral a lo largo de la Sierra Nevada de Santa Marta. Se recorrieron varias comunidades encontrando en ellas material disponible para la recolección, en los sectores de VICENTAMEGUA, ARACATACA en el departamento del Magdalena

CORDENADAS:



VICENTAMEGUA
N 10°40'40.5"
W 73°42'23.0"

ARACATACA
N 10°34'44.2"
W 74°10'55.3"

ÁLVARO J. OÑATE HERNANDEZ.
ING. DE MINAS – SEDEPROMA.



Guajira

	REPUBLICA DE COLOMBIA DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA ALCALDÍA DE URIBIA NIT. 892.115.155-4 CAPITAL INDÍGENA DE COLOMBIA		
	CÓDIGO: 888.06.04.01 INFORME DE GESTIÓN SEPTIMO INFORME	VERSIÓN: 2011 SECRETARIA DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y MEDIO AMBIENTE	

Febrero 05 2020.

**LA SUSCRITA LA SECRETARIA DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y MEDIO
AMBIENTE DE LA ALCALDÍA MUNICIPAL DE URIBÍA**

Asunto: inspección, muestro área minera BARITA.

La Secretaria De Desarrollo Productivo Y Medio Ambiente de La alcaldía Municipal de Uribí hace constar que Los ingenieros de petróleos DANIELA AMAYA COSTES Y FRANCISCO JAVIER GUTIÉRREZ SÁNCHEZ viajaron el día 4 de Febrero del 2020 al municipio de Uribí para emprender un recorrido con el objetivo de realizar un muestreo, inspección, recolección y transporte del mineral BARITA bajo las normas de seguridad y de explotación de los recursos naturales. **Ley 685 2001 código de minas.**

En acompañamientos del funcionario de la alcaldía municipal de Uribí el ingeniero de minas ÁLVARO JESUS OÑATE HERNANDEZ se realizó la recolección y transporte del mineral BARITA encontrada en los diferentes yacimientos del mineral a lo largo del Cerro de la Teta. Se recorrieron varias rancherías encontrando en ellas material disponible para la recolección, en los sectores de JATURRUMOU, KAIPANA, comunidades del corregimiento de jonjoncito municipio de Uribí la Guajira.

CORDENADAS:

JATURRUMOU
N 11°48'37.6"
W 071°51'11.3"

KAIPANA
N 11°48'38.6"
W 072°51'05.4"

ALVARO J. OÑATE HERNANDEZ.
ING. DE MINAS – SEDEPROMA.



ANEXO B

RESULTADOS BARITA SNSM Y ALTOS DE LA GUAJIRA

Barita SNSM



ima
Ingeniería medio ambiental S.A.S.

Análisis y Tratamiento de Aguas Potables,
Residuales, Piscinas, Suelos
y Cortes de Perforación.

Orden PLAB 00
Versión: 1
Fecha 2011/02/28

INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Daniela Araya
Dirección:	Universidad America
NIT:	
Contacto:	
Teléfono:	
Fax:	N.A.
E-mail:	
Departamento:	Cundinamarca
Municipio:	Bogotá

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No.:	4257 Barita gris
Matriz:	mineral
Responsable de Muestreo:	cliente
Plan de Muestreo IMA No.:	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Parcial
Fecha y Hora de Toma:	N.E.
Fecha y Hora de Recepción:	2020-03-07
Lugar de Muestreo:	Santa Marta Sierra Nevada
Departamento/Municipio:	Magdalena/ Santa Marta
Fecha de Análisis:	2020-03-07 @ 2020-04-30

RESULTADOS MUESTRA			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	RESULTADO MUESTRA
Plomo (Pb) [04]	digestión, Hach 8014	%	0,5
Aluminio	digestión, SM 3111 B Absorción atómica	%	0,01
Hierro	digestión, SM 3111 B Absorción atómica	%	0,05
Sódico (NaCl)	digestión, SM 4500 Si D	%	0,001
Calcio	digestión, SM Ca D	%	0,8
Magnesio	digestión, SM Mg D	%	0,9

OBSERVACIONES:
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.
Prohibida la reproducción total o parcial sin consentimiento del autorizador del Laboratorio.



ANALISTA LABORATORIO

.....

Calle 87 No. 49 - 21 - PBX: (571) 621 63 35
Cel.: 312 3522475 - 314 355 2939 comercial@imasas.com
Bogotá, D.C. Colombia

Barita Altos de la Guajira



Análisis y Tratamiento de Aguas Potables,
Residuales, Piscinas, Suelos
y Cortes de Perforación.

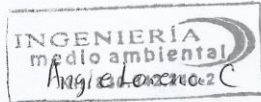
Código FLAB-08
VERSION : 7
Fecha 2011/09/28

INFORME REPORTE DE RESULTADOS LABORATORIO

INFORMACIÓN CLIENTE	
Empresa:	Daniela Amaya
Dirección:	Universidad America
Nit:	
Contacto:	
Teléfono:	
Fax:	N.A.
E: mail:	
Departamento:	Cundinamarca
Municipio:	Bogota
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Muestra IMA No. :	4256 Barita blanca
Matriz:	mineral
Responsable de Muestreo:	cliente
Plan de Muestreo IMA No. :	N.A.
Procedimiento de Muestreo:	N.E.
Tipo de Muestreo:	Puntual
Fecha y Hora de Toma:	N.E.
Fecha y Hora de Recep:	2020-03-07
Lugar de Muestreo:	Santa marta Sierra Nevada
Departamento/Municipio:	Magdalena/ sta marta
Fecha de Análisis	2020-03-07 @ 2020-04-30

RESULTADOS MUESTRA			
PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDAD	RESULTADO MUESTRA
Bario (BaSO4)	digestion, Hach 8014	%	53
Aluminio	digestion, SM 3111 B Absorcion atomica	%	0,02
Hierro	digestion, SM 3111 B Absorcion atomica	%	0,06
Silice (SiO2)	digestión, SM 4500 Si D	%	0,001
Calcio	digestión, SM Ca D	%	0
Magnesio	digestión, SM Mg D	%	0,6

OBSERVACIONES:
El resultado corresponde únicamente a la muestra analizada y bajo condiciones de prueba.
Prohibida la reproducción total o Parcial de este documento sin autorización del Laboratorio



ANGIE LORENA CARDENAS
ANALISTA LABORATORIO

01/07/2020

C:\Users\Usuario\Documents\2020\2 - Informes\4256 Daniela Amaya
Calle 87 No. 49 - 21 - PBX: (571) 621 63 35
Cel.: 312 3522475 - 314 355 2939 comercial@imasas.com
Bogotá, D.C. Colombia

1 DE 1

ANEXO C

FICHA TÉCNICA FOX BB WHITE

	FICHA TÉCNICA	Código: COM-R-12
		Versión: 03
		Fecha: 06-08-2018

NOMBRE COMERCIAL: BB WHITE
NOMBRE COMÚN: BARITA BLANCA
PRESENTACIÓN: SACOS X 25 KG

DESCRIPCIÓN Y CUALIDADES:

Polvo blanco muy fino, de alta gravedad específica, alta resistencia química y baja solubilidad en agua. Se utiliza como extensor de pigmento, sustituyendo hasta un 10% de Dióxido de Titanio, reduciendo el costo de la formulación y proporcionando una excepcional resistencia a los agentes atmosféricos, ácidos, etc.

PROPIEDADES FÍSICAS

Ítem	Método	Típico	Rango	Unidades
Residuo en Tamiz No-400(38µm)	LAB-PR-018	0.0019	0.0000 a 0.1200	%
Tamaño Máximo (Sedigraph)	LAB-PR-027	14.5	11.0 a 17.0	µm
TMP-d50 (Sedigraph)	LAB-PR-027	2.43	1.7 A 2.9	µm
Partículas <1 µm (Sedigraph)	LAB-PR-027	26.5	21 a 36	%
Blancura (Photovolt-FV)	LAB-PR-019	93.0	90.0 a 95.5	%
Índice de Blancura (Photovolt)	LAB-PR-019	88.1	81.0 a 91.5	%
Índice de Amarilleo	LAB-PR-019	2.47	1.0 a 4.75	%
Gravedad Específica (Mineral)	LAB-PR-009	4.441	4.20 A 4.45	—
Absorción de Aceite	LAB-PR-028	12.19	11.27 a 13.80	%
Fineza Hegman	LAB-PR-010	6 1/2	6 a 6 ¾	NS
Ph(Suspensión Acuosa al 10%)	LAB-PR-012	8.4	7.8 a 9.1	—

Calle 59 No. 35ª - 88 Bogotá – Colombia
 PBX: 571-3157382
 www.comercialfox.com

