

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA FABRICACIÓN DE
MATERIAL PROPANTE, BASE ARENA NATURAL, UTILIZADO EN EL
FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN COLOMBIA.**

ENRIQUE ALBERTO TONCEL HERNÁNDEZ



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

2013

**FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA FABRICACIÓN DE
MATERIAL PROPANTE, BASE ARENA NATURAL, UTILIZADO EN EL
FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN COLOMBIA.**

ENRIQUE ALBERTO TONCEL HERNÁNDEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
de petróleos**

Director:

MCs. FERNANDO CALVETE

Codirector:

Ing. RUBÉN DARÍO CASTILLO

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

2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi luz y darme las capacidades para consecución de tan importante logro.

A mis padres por darme la oportunidad de formarme académicamente, y por creer en mí.

A mis profesores quienes me han formado profesionalmente y por darme las orientaciones necesarias para la culminación de este trabajo de grado

A los ingenieros Álvaro Prada y Rubén Castillo quienes me guiaron en todo el proceso de desarrollo de este trabajo de grado.

A mi director de tesis Ingeniero Fernando Calvete quien supo dirigir este proyecto de grado por el mejor camino.

DEDICATORIA

Dedico este triunfo a mis padres por darme un hogar lleno de amor por confiar en mí, por su dedicación lo que me ha servido de fortaleza para mi desarrollo profesional, pero muy especialmente a mi papá porque a pesar de esos momentos difíciles me lleno de ánimo para seguir.

A mis hermanos por ser pacientes y por ser mis compañeros de ruta en este camino.

A mi abuela Carmen por sus oraciones al Señor, pidiendo por mi protección.

A mis tías Hirma y Neyra quienes siempre estuvieron acompañándome, con su cariño y sus consejos en este recorrido.

A Sandro, Martha, José y Juliana, quienes me abrieron las puertas de su hogar como un hijo más, siempre me apoyaron, me aconsejaron y estuvieron conmigo en los momentos difíciles.

A mis tías y primos que siempre creyeron en mis capacidades y estuvieron hay en los momentos difíciles para brindarme palabras de aliento.

A mis amigos y compañeros de estudio quienes compartieron conmigo todas esas noches de traspasado y los ratos de ocio que por una extraña razón siempre fueron más gracias; Lina, Silvia, Fanny, Andrés Julián.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| 1. MATERIAL PROPANTE | 18 |
| 1.1 GENERALIDADES DEL MATERIAL PROPANTE. | 18 |
| 1.2 TIPOS DE PROPANTES | 18 |
| 1.2.1 Arenas | 19 |
| 1.3 CLASIFICACION POR RESISTENCIA. | 20 |
| 2. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE ARENAS | 22 |
| 2.1 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN | 22 |
| 2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL MÉTODO | 24 |
| 2.3 MINERÍA POR DRAGADO | 27 |
| 2.4 PROCESAMIENTO DE LA ARENA | 28 |
| 2.4.1 Materias Primas | 28 |
| 2.4.2 Brechas en cuanto a la calidad del material | 28 |
| 2.4.3 El Proceso Manufactura | 31 |
| 2.4.4 Proceso de manufactura en Colombia | 35 |
| 2.4.5 Brechas entre el proceso de manufactura estándar y el colombiano | 37 |
| 3. PROPIEDADES DE LOS PROPANTES, PROTOCOLO DE PRUEBAS Y CONSIDERACIONES | 39 |
| 3.1 ESTÁNDAR DE PRUEBAS PARA PROPANTES | 39 |
| 3.2 MUESTREO DE PROPANTES | 39 |
| 3.3 TAMAÑO DE GRANO Y DISTRIBUCIÓN POR TAMAÑO DE GRANO. | 42 |
| 3.3.1 Prueba de tamaño | 43 |
| 3.3.2 Prueba de redondez y esfericidad | 44 |
| 3.3.3 Prueba de gravedad específica y densidad | 46 |
| 3.3.4 Calidad del material propante. | 47 |

| | |
|--|-----|
| 4. EVALUACION DE CANTERAS PARA USO EN LA INDUSTRIA PETOLERA COMO MATERIAL PROPANTE. | 50 |
| 4.1 FASE 1: SELECCIÓN PRELIMINAR DE CANTERAS PARA MUESTREO. | 50 |
| 4.2 FASE 2: ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN | 54 |
| 4.3 FASE 3: ESFERICIDAD Y REDONDEZ | 65 |
| 4.4 FASE 4. PRUEBA DE APLASTE O CRUSHING | 74 |
| 4.5 FASE 5. PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD. | 88 |
| 5. PRINCIPIOS BASICOS DE DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS..... | 90 |
| 5.1 IDENTIFICACIÓN Y ENUNCIACIÓN DEL PROBLEMA. | 91 |
| 5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL TAMIZADO | 91 |
| 5.2.1 Elección del diseño experimental | 91 |
| 5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL ESFERICIDAD Y REDONDEZ | 93 |
| 5.3.1 Elección del diseño experimental | 94 |
| 5.4 DISEÑO EXPERIMENTAL APLASTE O CRUSHING | 95 |
| 5.4.1 Elección del diseño experimental | 95 |
| 5.5 DISEÑO EXPERIMENTAL PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD | 98 |
| 5.5.1 Elección del diseño experimental | 98 |
| 6. ESTUDIO DE PROYECTOS DE INVERSIÓN | 100 |
| 6.1 ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVERSIÓN | 100 |
| 6.1.1 Identificación | 100 |
| 6.1.2 Estudio de alternativas | 100 |
| 6.1.3 Toma de decisiones | 101 |
| 6.1.4 Inversión | 102 |
| 6.1.5 Vida útil | 102 |
| 6.2 MATERIAL PROPANTE EN COLOMBIA. | 103 |
| 6.2.1 Comportamiento de la Demanda de propantes en Colombia durante los últimos tres años | 103 |
| 6.3 ANÁLISIS FINANCIERO | 106 |
| 7. GESTIÓN HSEQ Y AMBIENTAL | 113 |
| 7.1 LEGISLACIÓN MINERA EN COLOMBIA. | 113 |

| | |
|--|-----|
| 7.1.1 Derecho a explorar y explotar | 113 |
| 7.1.2 Zonas reservadas, excluidas y restringidas | 113 |
| 7.1.3 El contrato de concesión | 115 |
| 7.1.4 Los trabajos de exploración | 115 |
| 7.1.5 Construcción y montaje mineros | 118 |
| 7.1.6 Obras y trabajos de explotación | 119 |
| 7.1.7 Terminación de la concesión | 120 |
| 7.2 LICENCIAS AMBIENTALES | 121 |
| 7.2.1 Disposiciones generales | 121 |
| 7.2.2 Estudios Ambientales | 122 |
| 7.2.3 Control y Seguimiento | 123 |
| 7.3 REGULACIÓN DE DESCARGUE, TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE ESCOMBROS, MATERIALES, ELEMENTOS, CONCRETOS Y AGREGADOS SUELTOS, DE CONSTRUCCIÓN, DE DEMOLICIÓN Y CAPA ORGÁNICA, SUELO Y SUBSUELO DE EXCAVACIÓN. | 124 |
| 8. CONCLUSIONES | 129 |
| 9. RECOMENDACIONES | 130 |
| BIBLIOGRAFÍA | 131 |

LISTADO DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Arena utilizada como material de soporte | 19 |
| Figura 2. Arena recubierta de resina | 20 |
| Figura 3. Ubicación de formaciones productoras de arena en estados unidos. | 29 |
| Figura 4. Deposición de las unidades del paleozoico en tiempo geológico, Área de Ripon en Wisconsin | 30 |
| Figura 5. Esquema de proceso de manufactura de la arena. | 35 |
| Figura 6. Tamices de arena usados actualmente en Colombia | 37 |
| Figura 7. Caja - tipo de dispositivo de muestreo a granel | 40 |
| Figura 8. Divisor de muestra de propante. | 42 |
| Figura 9. Efecto del tamaño de propante en la permeabilidad a varias presiones de cierre | 43 |
| Figura 10. Carta de esfericidad y redondez por Krumbien y Sloos | 46 |
| Figura 11. Densidad bulk y gravedad especifica aparente | 47 |
| Figura 12. Raking de canteras | 51 |
| Figura 13. Distribución muestra 1 | 54 |
| Figura 14. Distribución muestra 2 | 55 |
| Figura 15. Distribución muestra 3 | 55 |
| Figura 16. Distribución muestra 4 | 56 |
| Figura 17. Distribución muestra 5 | 56 |
| Figura 18. Distribución muestra 6 | 57 |
| Figura 19. Distribución muestra 7 | 57 |
| Figura 20. Distribución muestra 8 | 58 |
| Figura 21. Distribución muestra 9 | 58 |
| Figura 22. Distribución muestra 11 | 59 |
| Figura 23. Distribución muestra 12 | 59 |

| | |
|--|-----|
| Figura 24. Distribución muestra 13 | 60 |
| Figura 25. Distribución 20/40 | 60 |
| Figura 26. Distribución 30/50 | 61 |
| Figura 27. Distribución 40/70 | 61 |
| Figura 28. Distribución Marcelo Arango | 62 |
| Figura 29. Distribución Bloque Marcelo Arango 2 | 62 |
| Figura 30. Distribución mina Las Moyas | 63 |
| Figura 31. Distribución mina Benicio | 63 |
| Figura 32. Distribución Silíceo Carreño | 64 |
| Figura 33. Distribución Mina Arenas Doradas 30/50 | 64 |
| Figura 34. Porcentaje de finos | 76 |
| Figura 35. Porcentaje de finos Arena Carreño 20/40 | 77 |
| Figura 36. Porcentaje de finos Arena Carreño 40/70 | 78 |
| Figura 37. Porcentaje de finos Arena Peñas Blanca 20/40 | 79 |
| Figura 38. Porcentaje de finos Arena Peñas Blanca 30/50 | 80 |
| Figura 39. Porcentaje de finos Arena Peñas Blanca 40/70 | 81 |
| Figura 40. Porcentaje de finos Arena Marcelo Arango 30/50 | 82 |
| Figura 41. Porcentaje de finos Arena Marcelo Arango 40/70 | 83 |
| Figura 42. Porcentaje de finos Arena Doradas 20/40 | 84 |
| Figura 43. Porcentaje de finos Arena Doradas 30/50 | 85 |
| Figura 44. Porcentaje de finos Arena Doradas 40/70 | 86 |
| Figura 45. Porcentaje de finos mina Benicio 30/50 | 87 |
| Figura 46. Comparativo de permeabilidad malla 20/40 | 88 |
| Figura 47. Comparativo de permeabilidad malla 30/50 | 89 |
| Figura 48. Aspectos principales del proyecto de inversión | 102 |
| Figura 49. Demanda Total de Propante en Colombia | 103 |
| Figura 50. Demanda de material propante arena natural. | 104 |
| Figura 51. Distribución por material propante | 104 |
| Figura 52. Comportamiento de la demanda de material propante | 106 |
| Figura 53. Comparativo de VPN de las diferentes opciones. | 112 |

LISTADO DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Presiones de confinamiento para distintos materiales de soporte. | 21 |
| Tabla 2. Comparación de procesos de manufactura. | 37 |
| Tabla 3. Informe de recolección de muestras | 51 |
| Tabla 4. Evaluación de esfericidad y redondez pozo siete. | 66 |
| Tabla 5. Evaluación de esfericidad y redondez recerbera San Rafael | 66 |
| Tabla 6. Evaluación de esfericidad y redondez arena punto 8. | 67 |
| Tabla 7. Evaluación de esfericidad y redondez arena puente Payoa | 67 |
| Tabla 8. Evaluación de esfericidad y redondez Represa de Sogamoso | 68 |
| Tabla 9. Evaluación de esfericidad y redondez Rio Mag. Pto Wilches | 68 |
| Tabla 10. Evaluación de esfericidad y redondez Caño el Cedro. | 69 |
| Tabla 11. Evaluación de esfericidad y redondez Mina Benicio | 69 |
| Tabla 12. Evaluación de esfericidad y redondez Mina Puerto Carreño. | 70 |
| Tabla 13. Evaluación de esfericidad y redondez Mina Las Moyas | 70 |
| Tabla 14. Evaluación de esfericidad y redondez Marcelo Arango 30/50. | 71 |
| Tabla 15. Evaluación de esfericidad y redondez Marcelo Arango 40/70. | 71 |
| Tabla 16. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Doradas 20/40. | 72 |
| Tabla 17. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Doradas 30/50. | 72 |
| Tabla 18. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 20/40 | 73 |
| Tabla 19. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 30/50 | 73 |
| Tabla 20. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 40/70 | 74 |
| Tabla 21. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para arena las Moyas 40/70. | 76 |
| Tabla 22. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Carreño 20/40 | 77 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 23. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Carreño 40/70 | 78 |
| Tabla 24. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Peñas Blanca 20/40 | 79 |
| Tabla 25. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Peñas Blanca 30/50 | 80 |
| Tabla 26. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Peñas Blanca 40/70 | 81 |
| Tabla 27. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Marcelo Arango 30/50 | 82 |
| Tabla 28. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Marcelo Arango 40/70 | 83 |
| Tabla 29. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Doradas 20/40 | 84 |
| Tabla 30. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Doradas 30/50 | 85 |
| Tabla 31. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Doradas 40/70 | 86 |
| Tabla 32. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para mina Benicio 30/50 | 87 |
| Tabla 33. Número de pruebas por nivel | 92 |
| Tabla 34. Secuencia aleatoria de pruebas | 93 |
| Tabla 35. Número de pruebas por nivel | 94 |
| Tabla 36. Secuencia aleatoria de pruebas | 95 |
| Tabla 37. Número de pruebas por nivel | 96 |
| Tabla 38. Secuencia aleatoria de pruebas | 97 |
| Tabla 39. Número de pruebas por nivel | 98 |
| Tabla 40. Secuencia aleatoria de pruebas | 99 |
| Tabla 41. Comportamiento de la demanda de material propante | 106 |
| Tabla 42. Opción 1 compra de arena importada a las compañías de servicio técnico | 108 |
| Tabla 43. Opción 2 compra de arena nacional a las compañías de servicio técnico | 109 |
| Tabla 44. Opción 3 compra de arena importada a un intermediario | 110 |
| Tabla 45. Opción 4 compra de arena nacional a un intermediario | 111 |
| Tabla 46. Comparativo de VPN para las diferentes opciones | 111 |

RESUMEN

Título: FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA PARA LA FABRICACIÓN DE MATERIAL PROPANTE, BASE ARENA NATURAL, UTILIZADO EN EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO EN COLOMBIA.

AUTOR: Enrique Alberto Toncel Hernández**

PALABRAS CLAVES: Fracturamiento, factibilidad, experimentos, propante, canteras.

Uno de los principales retos de la industria petrolera en Colombia es reducir los costos en el fracturamiento hidráulico de pozos. Gran parte de los costos del fracturamiento hidráulico pertenecen a la importación de material propante; por esto se hace necesario buscar alternativas como la fabricación del material propante en Colombia; además en la última década la industria petrolera se ha experimentado un aumento significativo en las operaciones de fracturamiento lo que implica aumento de la demanda de material propante mientras que la demanda se ha mantenido constante. Este estudio de factibilidad tiene como fin primordial entregar un concepto de que tan apropiado es implementar la fabricación de material propante en base arena natural aquí en Colombia, por esta razón en este trabajo de grado se centra en varios aspectos importan como lo son, estudiar del material propante utilizado actualmente en Colombia, seleccionar canteras que puedan servir para la fabricación de propantes base arena natural, tomando como criterio de selección la cantidad de material disponible, tipo de roca. También es necesario un diseño estadístico de experimentos que permita estudiar las características de calidad del material propante de las canteras preseleccionadas. Y finalmente la realización de una evaluación financieramente para la fabricación de material propante, con base a la información adquirida de las pruebas realizadas a las diferentes canteras.

*Proyecto de Grado
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas Escuela de Ingeniería de petróleos Director: M.Sc.
FERNANDO CALVETE

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL AND FINANCIAL FEASIBILITY MATERIAL FOR MANUFACTURING PROPPANT, NATURAL SAND BASE, USED IN COLOMBIA HYDRAULIC FRACTURING.*

AUTHOR: Enrique Alberto Hernandez Toncel. **

KEYWORDS: Fracturing, feasibility experiments, proppant, quarries.

One of the challenges of the oil company in Colombia is to reduce the operative cost of the hydraulic breaking in the wells. Most of the costs of hydraulic breaking belong to the importation of the proppant material, which makes necessary to look for options like the fabrication of proppant material in Colombia. Also the last decade of the oil industry has been marked by the excessive use of breaking which makes the demand of this material meanwhile the demand of petroleum is constant. This feasibility study has the finality to give a concept of how much appropriate is to implementate of fabrication of proppant material in base of natural sand here in Colombia. We must select the correct quarries to help have the best proppant fabrication in base of natural sand, have the is criteria to select the exact amount of available material and the type of rock.

Also is necessary a statistical design of experiments which permits to study the characteristics of quality of the proppant material of the preselectionated quarries. And finally the creation and making of a financial evaluation for the fabrication of proppant material, based on the information adquired with the tests made on different quarries.

* Graduation Project

** Faculty of Physical-Chemical Engineering School of Petroleum Engineering Director: M.Sc. FERNANDO CALVETE

INTRODUCCIÓN

En la última década se ha experimentado un aumento de operaciones de fracturamiento hidráulico como parte de la recuperación de hidrocarburos no convencionales, y el uso de material propante; mientras que la oferta cada día es menor. Prácticamente desde el año 2,000 el número de proveedores de material propante se ha mantenido constante. Entonces estas circunstancias parecen muy favorables para aquellos que desean entrar al mercado de material propante. Sin embargo aprovechar esta circunstancia representa un reto de enormes proporciones que requiere la coordinación de logística, material y recurso y conocimiento de procesamiento, y también se requiere una inversión de un capital significativo en el procesamiento y las instalaciones.

En estos momentos nos enfrentamos a un gran reto de recuperar reservas de gas significativas, la demanda de material propante base arena natural experimentara un aumento por estas razón es apropiado buscar alternativas que cubra el requerimiento de este material y a la vez nos ofrezca una reducción en los costos de fracturamiento. Por esta razón se hace necesario estudiar alternativas tales como la fabricación del material.

Para lograr la fabricación del material propante a partir de arena natural aquí en Colombia se hace necesario un estudio de factibilidad que tenga en cuenta aspectos como la cantidad de material que se requiere para que sea rentable la fabricación, la calidad del recurso, y no menos importante la factibilidad financiera de la inversión.

Por esto a continuación se presenta un estudio de sobre la forma en la cual se explotan las arenas naturales, se evalúan y posteriormente se procesan para el uso en la industria, además de esto se evalúan técnica y financieramente fuentes de este material para la fabricación de material propante en Colombia.

1. MATERIAL PROPANTE.

1.1 GENERALIDADES DEL MATERIAL PROPANTE.

Son materiales sólidos utilizados como agentes de sostén en las fracturas creadas en procesos de fracturamiento hidráulico. Se encargan de mantener abierta la fractura, preservando la conductividad de la misma. Se conocen también con el nombre de apuntalante.

Existen dos categorías de propantes que son usados actualmente, arenas naturales y cerámicos o propantes de bauxita. Las arenas son utilizadas para formaciones con presiones de cierre menores a 6000 psi, que comúnmente se presentan a profundidades inferiores de 8000 pies. Mientras que los propantes cerámicos son usados para formaciones con presiones de cierre mayores de 6000 psi, también pueden ser utilizadas en casos donde se necesite una alta permeabilidad, para optimizar la conductividad de la fractura.

1.2 TIPOS DE PROPANTES

En la industria del petróleo se tienen varios tipos de propantes, siendo el más convencional y de mayor uso la arena natural. También se han desarrollado materiales de soporte que son más resistentes y capaces de soportar mayores presiones de confinamiento en el fondo del pozo, son conocidos como propantes de intermedia y alta resistencia.

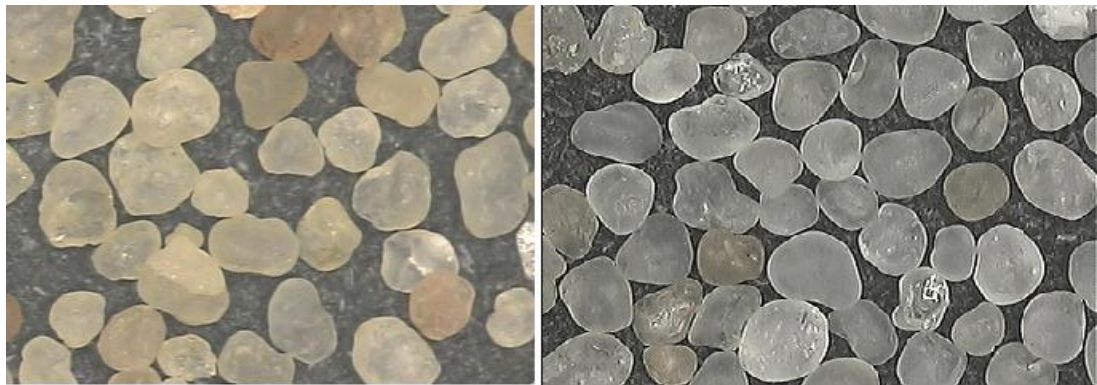
Dentro de los propantes más comunes encontramos: arena natural, arena resinada, cerámicos, cerámicos recubiertos con resina (curado parcial y completo), bauxita y bauxita recubierta con resina. Otros menos comunes son: cáscara de

nuez, bolas de aluminio o acero, esferas de cristal y propantes de bajo peso específico.

1.2.1 Arenas. Las arenas Ottawa y Brady son en gran medida las más usadas en la industria del gas y petróleo. Estas comúnmente llamadas arenas marrones y blancas por su color característico. Dependiendo de un balance general de las propiedades físicas de la arena se pueden subdividir en excelente, bueno y deficiente, este balance se realiza según los estándares (API RP 56, 1983; and ISO 13503-2, 2006).

Las arenas de alta calidad, vienen principalmente del norte de estados Unidos, comúnmente llamada como "Ottawa sand". La arena Brady, se clasifica como una calidad estándar, reúne o excede las especificaciones aceptadas por la industria de material propante para fracturamiento hidráulico. Estas arenas se utilizan ampliamente a lo largo del mundo.³

Figura 1. Arena utilizada como material de soporte



Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

³ ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

1.3 CLASIFICACION POR RESISTENCIA.

De acuerdo a su resistencia a la compresión, los materiales de soporte actualmente en uso se recomiendan para las siguientes presiones de cierre:

- **Materiales De Soporte De Resistencia Baja**

Son los agentes de sostén que poseen una resistencia a la ruptura menor a 5000 psi, dentro de este grupo se encuentra la arena natural o arena común. Las más comunes son la arena Ottawa y la arena Brady.

- **Materiales De Soporte De Resistencia Intermedia**

Son los agentes de sostén que poseen una resistencia a la ruptura entre los 5000 y 10000 psi. En este grupo se encuentran las arenas resinadas (RCS), los cerámicos, los cerámicos resinados (CRC) y algunos propantes de bajo peso específico.

Figura 2. Arena recubierta de resina



Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

- **Materiales De Soporte De Alta Resistencia**

Son los agentes de sostén que poseen una resistencia a la ruptura entre los 10000 y 12000 psi, la versión recubierta con resina resiste hasta 15000 psi. En este

grupo se encuentran las bauxitas. Dentro de sus desventajas se encuentra su elevado costo comparado con los otros materiales y su alta densidad (3.60 gr/cm³ para la bauxita), además pueden llegar a ocasionar problemas por decantación en la fractura y equipos de superficie.

- **Propantes especiales**

Dentro de este grupo se encuentran los propantes de bajo peso específico, conocidos como ULWP, con gravedades específicas de 1.06, 1.25, 1.75. Su aplicación es limitada a casos específicos debido a su alto costo.

Tabla 1. Presiones de confinamiento para distintos materiales de soporte.

| Propante | Gravedad específica | Presión de Cierre | Profundidad x 1000 ft |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Arena natural | 2,65 | 5000 psi | 0 - 10 |
| Cerámica de baja densidad RCS-CRCS | 2,72 | 6000-8000 psi | 7 - 11 |
| Cerámica de densidad intermedia | 3,15 | 8000-10000 psi | 8 - 12 |
| bauxita | 3,60 | 10000-12000 psi | 12 - 20 |
| Propantes especiales | 1,05 - 2,02 | Hasta 7000 psi | 0-8 |

Fuente: Ecopetrol, Informe: Propantes En Shale Plays: Evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el Piloto de Shale Gas

2. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN DE ARENAS.

El método de explotación es la estrategia global que permite la excavación y extracción de un cuerpo mineralizado del modo técnico y económico más eficiente:

- Define los principios generales según los que se ejecutan las operaciones unitarias.
- Define criterios con respecto al tratamiento de las cavidades que deja la extracción.

2.1 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

Una primera clasificación de los métodos se refiere a si la explotación se realiza siempre expuesta a la superficie o si se desarrolla a través de labores subterráneas. Así, debemos primero separar:

- Métodos de explotación a cielo abierto
- Métodos de explotación subterránea

Entre los métodos de explotación de superficie, se pueden identificar los siguientes:

- Cielo abierto, rajo abierto o tajo abierto (llamado Open Pit en inglés).
- Cantera (llamado Quarry en inglés). Este nombre se da a la explotación de mineral que puede utilizarse directamente en aplicaciones industriales, como es el caso de la sílice, caliza y piedra de construcción.

- Lavaderos o placeres, corresponde a la explotación de depósitos de arena en antiguos lechos de ríos o playas, con el fin de recuperar oro, piedras preciosas u otros elementos químicos valiosos.

En cuanto a los métodos de explotación subterráneos, se distinguen según el tratamiento que hagan de la cavidad que deja la extracción de mineral. Sin embargo, en la práctica, la explotación requiere variar y combinar los métodos presentados a continuación, dado que los depósitos raramente se ajustan exactamente a las características ideales de aplicación de alguno de los métodos.

- Métodos autosoportantes o de caserones abiertos: Corresponden a aquellos que consideran la extracción del mineral y dejar la cavidad que éste ocupaba vacía. Para ello, el caserón debe mantenerse estable en forma natural (ser autosoportante) o requerir escasos elementos de refuerzo. Estos caserones se dejan vacíos una vez que concluye la explotación.
 - Room and Pillar
 - Stope and Pillar
 - Shrinkage Stopping
 - Sublevel Stopping
 - Vertical Crater Retreta
- Métodos soportados o de caserones que requieren elementos de soporte para mantenerse estables y/o que se rellenan con algún material exógeno.
 - Cut and Fill Stopping
 - Excavation Techniques
 - Backfilling Methods

- Métodos de hundimiento, esto es, donde las cavidades generadas por el mineral extraído son rellenas con el material superpuesto (mineral, mientras dura la explotación, y estéril, una vez finalizada). El hundimiento y consecuente relleno de las cavidades se produce simultáneamente a la extracción del mineral.
- Longwall Mining
- Sublevel Caving
- Block / Panel Caving⁴

2.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL MÉTODO

- **Características Espaciales**

Rajo vs Subterránea; afectan tasa de producción, método de manejo de material, diseño de la mina en el depósito.

- Tamaño (alto, ancho o espesor)
- Forma (tubular, lenticular, masivo, irregular)
- Disposición (inclinado, manteo)
- Profundidad (media, extremos, razón de sobrecarga)

- **Condiciones Geológicas e Hidrológicas**

Tanto de mineral como de roca de caja (o huésped); afecta la decisión de usar métodos selectivos o no selectivos

- Requerimiento de drenaje, bombeo, tanto en rajo como en subterránea
- Mineralogía es importante para procesos
- Mineralogía y petrografía (óxidos vs. sulfuros)
- Composición química

⁴ ORTIZ, Julián (2007). Apuntes de curso de explotación de minas.

- Estructura del depósito (pliegues, fallas, discontinuidades, intrusiones)
- Planos de debilidad (grietas, fracturas, clivaje)
- Uniformidad, alteración, meteorización (zonas, límites)
- Aguas subterráneas e hidrología (ocurrencia, flujo, nivel freático)

- **Consideraciones Geotécnicas**

Selección del método (soporte necesario); hundibilidad

- Propiedades elásticas
- Comportamiento plástico o viscoelástico
- Estado de los esfuerzos (originales, modificados por la excavación)
- Consolidación, compactación, competencia
- Otras propiedades físicas: (gravedad específica, poros, porosidad, permeabilidad)

- **Consideraciones Económicas**

Determinan el éxito del proyecto; afectan inversión, flujos de caja, periodo de retorno, beneficio

- Reservas (tonelaje y ley)
- Tasa de producción
- Vida de la mina (desarrollo y explotación)
- Productividad
- Costo de mina de métodos posibles de aplicar

- **Factores Tecnológicos**

Se busca la mejor combinación entre las condiciones naturales y el método de explotación.

- Porcentaje de recuperación
- Dilución
- Flexibilidad a cambios en la interpretación o condiciones
- Selectividad
- Concentración o dispersión de frentes de trabajo
- Capital, mano de obra, mecanización

- **Factores Medioambientales**

No sólo físico, sino que también económico, político y social.

- Control de excavaciones para mantener integridad de las mismas (seguridad)
- Subsistencia y efectos en superficie
- Control atmosférico (ventilación, control de calidad de aire, calor, humedad)
- Fuerza laboral (contratos, capacitación, salud y seguridad, calidad de vida, condiciones de comunidad)

En consideración a estos factores, se debe tomar una decisión respecto a si explotar el cuerpo mineralizado mediante métodos de explotación de superficie o métodos de explotación subterráneos.

Las características espaciales (geometría del cuerpo) y la competencia de la roca son esenciales dado que pueden determinar la conveniencia de utilizar un método por sobre otros. Sin embargo, puede haber casos en los que el depósito puede explotarse mediante métodos de superficie o subterráneos. En estos casos, es

necesario tomar la decisión en función del beneficio económico que se generará en cada caso.⁵

2.3 MINERÍA POR DRAGADO

El dragado de aguas poco profundas es con toda probabilidad el método más barato de extracción de minerales. Por aguas poco profundas se entienden aguas de hasta 65 m. En esas condiciones se pueden recuperar sedimentos poco compactos empleando dragas con cabezales de corte situados en el extremo de tubos de succión, o con una cadena de cangilones de excavación que gira alrededor de un brazo.

La minería por dragado se está modernizando: por ejemplo, en la mina de Kovin, situada en territorio de la antigua Yugoslavia, se emplea una draga para extraer dos capas de lignito y los lechos de grava que las separan, en un lago artificial, junto al río Danubio, creado para este fin. Se prevé que en el futuro se introduzcan más dragas de este tipo, que permitan una extracción selectiva y precisa.

La minería oceánica es un método reciente. En la actualidad se realiza en las plataformas continentales, en aguas relativamente poco profundas. Entre sus actividades están la extracción de áridos, de diamantes (frente a las costas de Namibia y Australia) y de oro (en diversos placeres de todo el mundo).

Ya se ha diseñado y probado la tecnología para realizar actividades mineras en fondos marinos profundos. A profundidades de hasta 2.500 o 3.000 m hay conglomerados de rocas ricas en metales denominadas nódulos de manganeso por ser éste el principal metal que contienen. En los nódulos también hay cantidades significativas de otros metales, entre ellos cobre y níquel. La tecnología de dragado para su recuperación está ya disponible, aunque ese tipo de

⁵ HERRERA HERBERT, Juan (2007). Métodos de minería a cielo abierto. Madrid España.

actividades se encuentra en fase experimental hasta que las condiciones económicas y políticas las hagan factibles.⁶

2.4 PROCESAMIENTO DE LA ARENA

A continuación se describe el proceso de funcionamiento de la línea de producción de arena estándar, este proceso no siempre se sigue al pie de la letra, dependiendo de las condiciones particulares del tipo de material a procesar, puede tener ciertas variaciones.

La arena es un material fragmentado, de origen natural compuesto por partículas muy pequeñas de rocas. La arena se utiliza para proporcionar volumen, fuerza y otras propiedades a los materiales de construcción tales como asfalto y el hormigón. También se utiliza como un material decorativo en jardinería. Los tipos específicos de arena se utilizan en la fabricación de vidrio y como un material de moldeo para fundición de metales. Otras arenas se utilizan como un abrasivo en chorro de arena y para hacer papel de lija, y para nuestro caso en particular es usada en operaciones de fracturamiento hidráulico.

2.4.1 Materias Primas. La arena más común está compuesta de partículas de cuarzo y feldespatos. Partículas de arena de cuarzo son incoloras o ligeramente rosadas, mientras que la arena de feldespato tiene un color rosa o ámbar. Arenas negras, como las que se encuentran en Hawái, se componen de partículas de obsidiana que se formaron por la actividad volcánica.

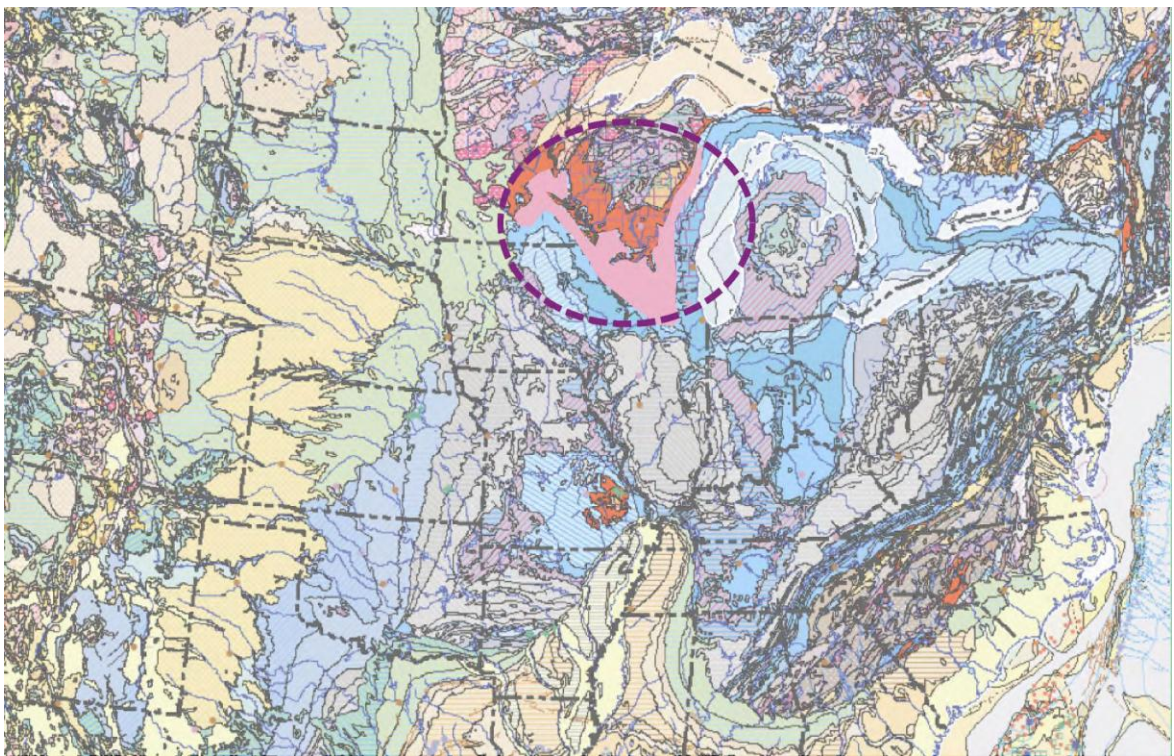
2.4.2 Brechas en cuanto a la calidad del material. En Estados Unidos, los principales yacimientos de arena que se usan para fracturamiento hidráulico se encuentran en los estados de Minnesota y Wisconsin, existen tres formaciones productoras de arena apta para esta industria, dos del periodo cámbrico,

⁶ Disponible en: <http://corandesperu-percy.blogspot.com/2009/10/mineria-por-dragado.html>

Wonewoc y Jordan y una en el ordovícico llamada St. Peter, todas estas formaciones pertenecen a la era paleozoica.

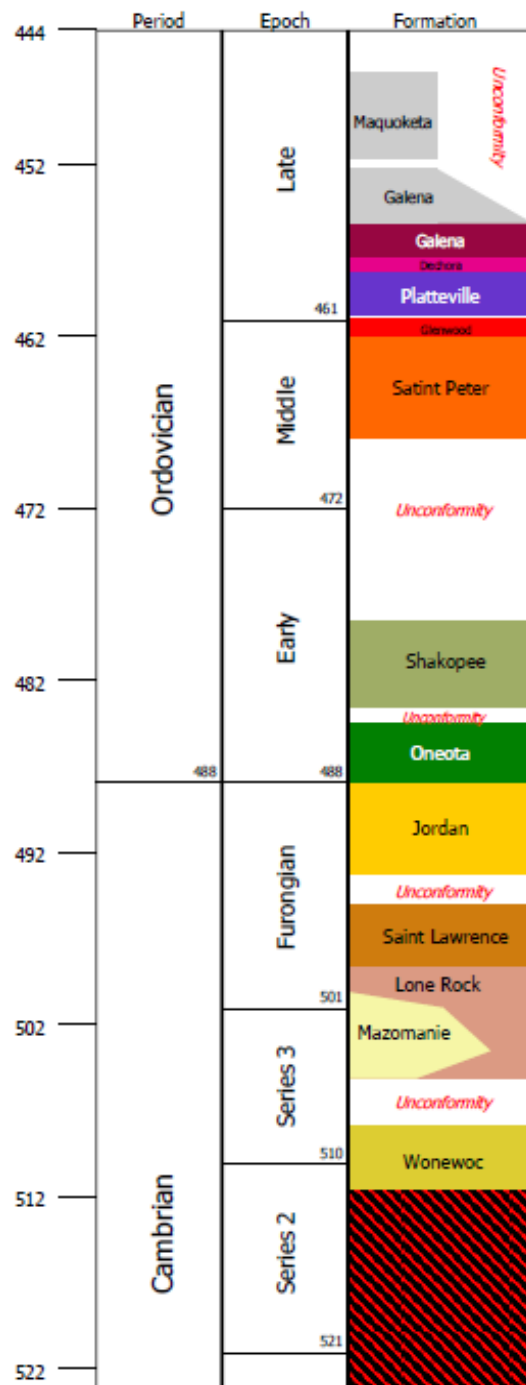
Cabe resaltar que esta zona está ubicada cerca de los grandes lagos, y que no ha sufrido grandes esfuerzos geológicos en tiempos (geológicos) recientes, por lo tanto en su mayoría son llanuras extensas; esto afecta positivamente a las formaciones productoras de arena ya que los granos no han sufrido esfuerzos, lo que podría microfracturar los granos de arena lo que consecuentemente se vería reflejado en la conductividad final del material una vez concluido el fracturamiento hidráulico

Figura 3. Ubicación de formaciones productoras de arena en estados unidos.



Fuente: Silica Sand Geologic and Landscape Context Tony Runkel

Figura 4. Deposition of the Paleozoic units in geological time, Ripon Area Wisconsin



Fuente: Geology of the Ripon Wisconsin Area Publication Number: G-052010-1A Written By: Steven D.J. Baumann

2.4.3 El Proceso Manufactura. La preparación de arena consta de cinco procesos básicos: La descomposición natural, extracción, separación, lavado, y en algunos casos de trituración. El primer proceso, la descomposición natural, por lo general tarda millones de años; los otros procesos toman mucho menos tiempo.

Por lo general la planta de procesamiento se encuentra cercana al depósito natural de material para minimizar los costos de transporte. Si la planta está ubicada al lado de una duna de arena o en la playa, la planta puede procesar sólo arena. Si se encuentra junto al lecho de un río, por lo general procesar tanto la arena y grava, porque los dos materiales se mezclan a menudo. La mayoría de las plantas son estacionarias y pueden operar en el mismo lugar por décadas. Algunas plantas son móviles y se puede dividir en componentes separados para ser remolcados a la cantera. Plantas móviles se utilizan para proyectos de construcción remotos, donde no hay plantas estacionarias cerca.

La capacidad de la planta de procesamiento se mide en toneladas por hora de salida de producto terminado. Plantas estacionarias pueden producir varios miles de toneladas por hora. Plantas móviles son más pequeñas y su salida es por lo general en el intervalo de 50-500 toneladas (50.8-508 toneladas métricas) por hora.

Los pasos siguientes son comúnmente usados para procesar arena

La descomposición natural

- Una roca sólida se rompe en pedazos por las fuerzas naturales mecánicas, tales como el movimiento de los glaciares, la expansión del agua en las grietas durante la congelación, y los impactos de las rocas que caen unos sobre otros.

- Los trozos de roca que se desglosan en los granos por la acción química de la vegetación y la lluvia combinada con los efectos mecánicos como las partículas cada vez más pequeños se van desgastando por el viento y el agua.
- Los granos de roca se transportan en las vías fluviales, algunos se depositan en la orilla, mientras que otros finalmente llegar al mar, donde puede unirse con los fragmentos de coral o conchas para formar playas. Por el viento en la arena se pueden formar dunas.

Extracción

- Extracción de arena puede ser tan simple como usar una pala. Para extraer arena de río se utiliza un vehículo llamado cargador frontal, la arena se excava por debajo del agua utilizando dragas flotantes. Estas dragas tienen un boom de largo con una cabeza de corte giratoria para aflojar los depósitos de arena y un tubo de succión para succionar la arena.
- La arena se extrae con un cargador frontal, entonces se vierte en un camión o tren, o se colocan sobre una cinta transportadora para el transporte a la planta de procesamiento cercana. Si la arena se extrae de debajo del agua con una draga, la suspensión de arena y el agua se bombea a través de una tubería a la planta.

Clasificación

- En la planta de procesamiento, el material entrante se mezcla primero con agua, si no está ya mezclada, como parte de una suspensión, y se descarga a través de unos tamices en el alimentador para separar piedras, terrones de arcilla, palos, y otros materiales extraños. Si el material está fuertemente unido

entre sí con la arcilla o tierra, se puede entonces pasar a través de un molino de cuchillas que lo rompe en pequeños trozos.

- El material entonces pasar a través de varias tamices con diferentes diámetros de aberturas para separar las partículas según el tamaño. Se hace vibrar para permitir que el material quede atrapado en cada nivel según su tamaño y luego es transportado por cintas transportadoras separadas. El tamiz con los agujeros más grandes, está en la parte superior, y debajo está el tamiz tienen agujeros cada vez más pequeños.

Lavado

- El material que sale del tamiz más grueso es llevado a la lavadora, esta máquina tiene una forma de cono invertido para facilitar la separación de la arena que sale por la parte inferior y la arcilla que es retirada por medio de un tubo ubicado en la parte superior de esta. Dentro de esta máquina se encuentran unas cuchillas que rotan a través del material a medida que pasa a través de la máquina para despojar cualquier arcilla restante o suelo blando. Las partículas más grandes de grava se separan y se tamizan en diferentes tamaños, mientras que las partículas de arena más pequeños que habían sido unidos a la grava se pueden llevar de nuevo y se añade a la corriente de material entrante.
- La arena se retira de la parte inferior de la máquina de lavado con la rotación de los tornillos de desagüe, que se mueven lentamente la arena hasta el interior de un cilindro inclinado.

Aplastante

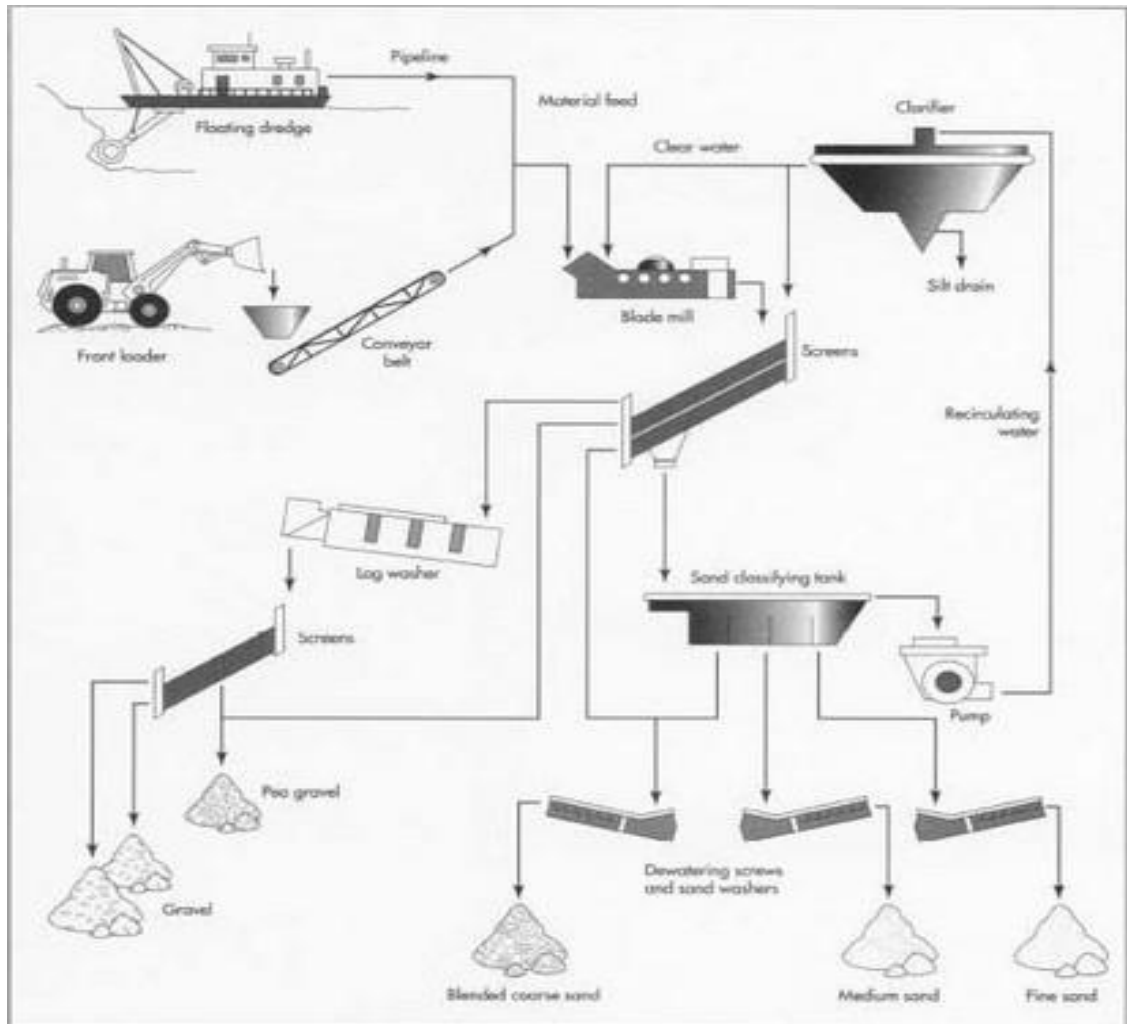
- Algunas arenas se trituran para producir un tamaño específico o una forma que no está disponible de forma natural. La trituradora puede ser un tipo cono giratorio en el que la arena cae entre un cono giratorio superior y un cono inferior fijo que están separados por una distancia muy pequeña. Cualquier partícula más grande que esta distancia de separación son triturados entre los conos de metales pesados, y las partículas resultantes se caen de la parte inferior.

Control de calidad

- Las plantas de procesamiento más grandes utilizan una computadora para controlar el flujo de materiales. La velocidad de alimentación del material entrante, la velocidad de vibración de las pantallas de selección y el caudal del agua a través del tanque de arena para clasificar todo, determinar las proporciones de los productos terminados que deben ser supervisados y controlados.⁷

⁷ Disponible en: <http://www.madehow.com/Volume-3/Sand.html#b>

Figura 5. Esquema de proceso de manufactura de la arena.



Fuente: <http://www.madehow.com/Volume-3/Sand.html#b>

2.4.4 Proceso de manufactura en Colombia. En Colombia actualmente el proceso de manufactura es similar al utilizado en plantas de procesamiento a gran escala, este proceso consta de cuatro pasos básicos: Extracción, lavado, secado, y clasificación en su orden. La principal diferencia con el proceso estándar radica en el orden de los pasos, mientras que el método estándar se tamiza con la arena húmeda, en Colombia actualmente primero se seca la arena y posteriormente se tamiza, esto se debe principalmente a la disponibilidad de agua, y la automatización del proceso. Actualmente este proceso es muy básico en Colombia ya que no existe una gran demanda de arena para la industria.

Extracción

- La extracción en Colombia principalmente se lleva a cabo a través de maquinaria pesada, en graveras de donde se extrae la arena, en algunos casos, es necesario utilizar voladura con dinamita para desconsolidar el material para el posterior cargado y transporte

Lavado

- Una vez extraído el material es depositado en una especie de piscinas donde se termina de desconsolidar a través de chorros de agua, posteriormente la arena por la fuerza del agua, es arrastrada hasta otra piscina por medio de un canal entre ellas, mientras la arena es arrastrada por gravedad, la arcilla es separada de la arena y se va junto con el flujo de agua.

Secado

- Posterior al lavado, la arena es secada sobre una placa de acero giratoria que es calentada alrededor de dos a tres horas.

Clasificación

- Cuando la arena se encuentra seca, se lleva a tamices para ser clasificada por su tamaño y almacenados en costales como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Tamices de arena usados actualmente en Colombia



Fuente: Autor

2.4.5 Brechas entre el proceso de manufactura estándar y el colombiano. La industria de la fabricación de material propante a base de arena natural en Colombia, actualmente presenta algunas brechas frente al método estándar, por eso, es necesario fortalecer la industria ya presente para brindar a la industria un producto con todos los estándares internacionales.

Tabla 2. Comparación de procesos de manufactura.

| | Proceso estándar | Proceso en Colombia |
|----------------------|---|--|
| Extracción | Se lleva a cabo a través de maquinaria pesada palas hidráulicas o uso de dragas | Se lleva a cabo a través de maquinaria pesada "palas hidráulicas", aun no se implementa el uso de dragas para este propósito |
| Clasificación | Este proceso es automatizado con la ayuda de cintas transportadoras y la ayuda de tamices de gran capacidad | Los tamices son cargados manualmente por obreros y posterior a la clasificación son almacenados en costales |
| Lavado | Se usa una lavadora de arena especializada con forma de cono invertido | Se usan chorro de agua de alta presión y una serie de piscinas inmediatamente |

| | Proceso estándar | Proceso en Colombia |
|---------------------------|---|---|
| | una vez clasificado el material | después de ser extraído el material. |
| Aplaste | Se usa una trituradora de cono giratorio en el que la arena cae entre un cono giratorio superior y un cono inferior fijo que están separados por una distancia muy pequeña | Este paso aún no se implementa en la industria colombiana. |
| Control de calidad | Se utilizan una computadora para controlar el flujo de materiales. La velocidad de alimentación del material entrante, la velocidad de vibración de las pantallas de selección y el caudal del agua a través del tanque de arena para clasificar todo, determinar las proporciones de los productos terminado que deben ser supervisado y controlado. | En Colombia este paso se realiza manualmente con la verificación del producto ya terminado. |

Fuente: Autor

3. PROPIEDADES DE LOS PROPANTES, PROTOCOLO DE PRUEBAS Y CONSIDERACIONES.

3.1 ESTÁNDAR DE PRUEBAS PARA PROPANTES

El Instituto Americano del Petróleo recomienda prácticas para propantes utilizados en el fracturamiento hidráulico, en 1990 debido a políticas de la API (Instituto Americano del Petróleo), recomienda que las normas deban ser revisadas cada 5 años.

En 1998 la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), aceptada en 153 países, forman un comité para revisar y reescribir las recomendaciones API en prácticas en las normas ISO. El comité fue elegido para combinar los tres métodos recomendados para las pruebas de propantes y grava (56, 58, 60) en una sola norma.

La ISO publico la norma ISO 13503-2 “Medición de las propiedades de propantes utilizados en el fracturamiento hidráulico y grava de empaquetamiento en operaciones” en 2006. (API posteriormente aprobó y publico el estándar ISO como API practica recomendada 19C).⁸

3.2 MUESTREO DE PROPANTES

La toma de muestra y separación del material a granel son pasos críticos para asegurar que cualquier prueba sea representativa de una muestra de propantes.

⁸ ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

Es importante tener una buena comprensión de la separación cuando se hace un muestreo de propantes. Dependiendo el tamaño, forma, distribución, y mecanismos implicados, hay una cierta variabilidad en la práctica de muestreo debido a la separación. Partículas, tales como los propantes naturalmente encuentran menor resistencia cuando se mueven o cuando se les aplica una fuerza. Durante el traslado o movimiento, las partículas de diferente tamaño y masa naturalmente se separan.

Las partículas finas migran y normalmente se alojan dónde están en la arena. Las partículas más pesadas y gruesas rebotan y ruedan mucho más lejos estratificando el material por tamaño. El grado de separación y estratificación dependen de los mecanismos implicados en la transferencia del propante. Los procedimientos de muestreo definidos por la norma ISO 13503-2 se desarrollaron para minimizar los efectos de separación de las partículas por tamaño.

Figura 7. Caja - tipo de dispositivo de muestreo a granel



Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

Se recomienda un dispositivo como el de la figura para realizar el muestreo. El dispositivo tiene unas dimensiones de 8 x 6 x 4 pulgadas, con una ranura de ½ pulgada y se mueve hacia adelante y atrás de la corriente que fluye de propantes. Por otra parte, las muestras también podrán obtenerse por medio de dispositivos de muestreo automático en la fábrica o centro de distribución. Estos dispositivos realizan un barrido intermitente, pero regular en flujo de propantes para aislarlo en una botella.

Cuando es absolutamente necesario obtener una muestra del producto de un contenedor o camión se usa una sonda de muestreo que debe introducirse aproximadamente a 3 pies y luego abrirla y así obtener la muestra. Una vez que se haya obtenido una muestra representativa; la muestra debe ser dividida para asegurar que las pruebas de las propiedades del propante sean exactas tales como la densidad aparente, densidad, resistencia al aplaste y la de tamiz de tamaño.

Cada una de estas pruebas se puede ver afectada por la distribución en el tamaño. La muestra debe dividirse para obtener una cantidad apropiada para todas las pruebas que se llevaran a cabo esto se realiza con un dispositivo como el que se muestra en la figura 14. Por ejemplo si solo es necesario realizar un análisis granulométrico, a continuación la muestra debe ser dividida hasta llegar aproximadamente 100 gramos y ajustada hasta alcanzar 100 gramos. Si el material disponible está entre 50 y 100 libras, entonces el costal de material debe ser reducido utilizando un reductor de muestra.⁹

⁹ ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production. Houston TX: ET Publishing 2007. 536 p.

Figura 8. Divisor de muestra de propante.



Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

3.3 TAMAÑO DE GRANO Y DISTRIBUCIÓN POR TAMAÑO DE GRANO.

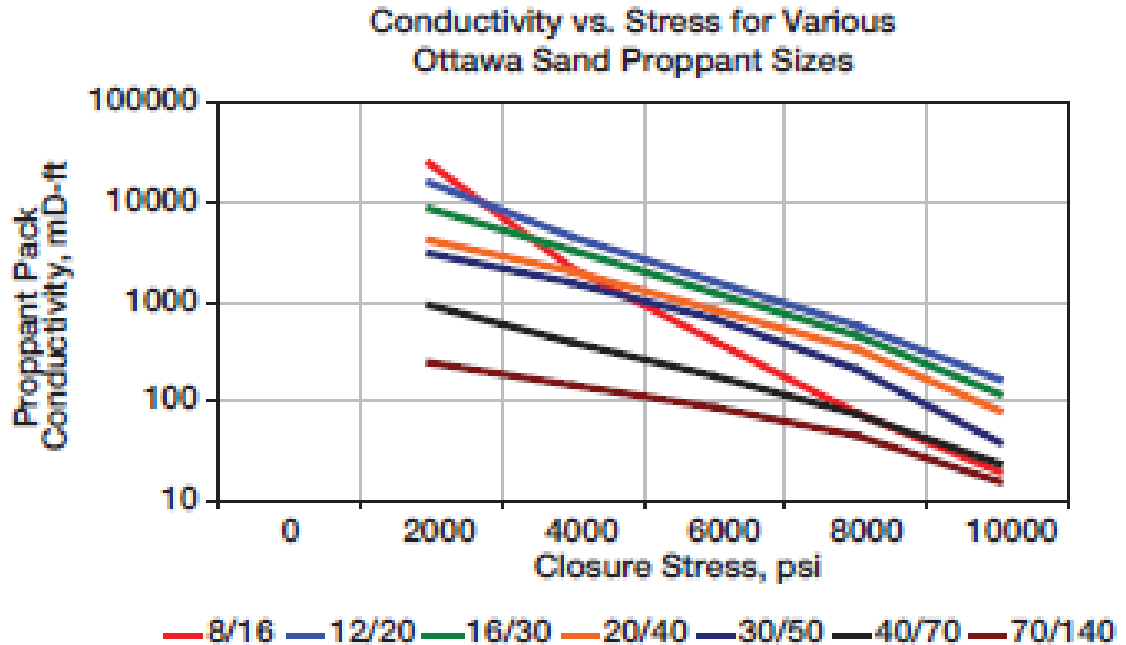
El tamaño del propante es reconocido como una característica clave para describir y controlar la calidad del material propante. El tamaño del propante y su distribución afectan directamente la permeabilidad una vez realizado el fracturamiento hidráulico.

El tamaño de grano del propante se conoce como la medida del diámetro de los granos, y la distribución de tamaño de grano se refiere a la amplitud de la gama de tamaños de grano presentes en determinada muestra de propantes.

Propantes con tamaño de grano más grandes proporcionan una mejor permeabilidad. Sin embargo a medida que aumenta el tamaño de grano disminuye la resistencia al aplastamiento. Así, que tamaños de grano más grandes no son recomendables para pozos profundos debido a la mayor susceptibilidad a la

trituration. La figura 9, ilustra el efecto del tamaño de grano en la permeabilidad a medida que aumenta las presiones de cierre.¹⁰

Figura 9. Efecto del tamaño de propante en la permeabilidad a varias presiones de cierre



Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

3.3.1 Prueba de tamaño. El propósito de este procedimiento es garantizar una metodología constante para el análisis granulométrico y proporcionar un procedimiento consistente para la evaluación de los tamaños en el tamiz.

La prueba de tamiz para propantes se debe llevar a cabo en un "Ro-Tad" tamizadora. Este equipo se diferencia de las pilas de tamiz utilizadas en mecánica de suelos o las aplicaciones de ingeniería civil ya que incorpora un martillo en la parte superior de la pila. A menudo cuando los propantes se analizan y el equipo carece de un mecanismo de martillo dan lugar a errores en la distribución.

¹⁰ ECONOMIDES, Michael. Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

La nueva norma ISO requiere que el tamiz debe comprender al menos 7 etapas de calibrado, la cantidad de la muestra debe ser de (100g \pm 20g) utilizada en la muestra y la columna de tamices debe ser sacudida durante al menos 10 minutos.

La tabla muestra los tamaños de tamiz que debe ser empleados para las pruebas de diferentes tamaños de propantes. Los estándares de la industria sugieren utilizar las siguientes limitaciones en la distribución del tamiz para el material propante.

- Al menos el 90% del material debe estar comprendido entre dos tamaños de malla. Es decir para el tamaño 20/40, el 90% debe ser retenido entre la malla 20 y la 40
- No más del 10% del material puede ser más grueso que el mayor tamaño de malla. Es decir para el tamaño 20/40, menos del 10% debe ser retenido entre la malla 16 y la malla 20.
- No más del 0,1% del material puede ser más grueso que el tamaño de malla más grande de la próxima. Es decir para el tamaño 20/40 no más del 0.1% puede exceder el tamaño de la malla 16.
- No más del 1% puede caer en el sartén. Es decir para el tamaño 20/40 no más del 1% puede ser más pequeño que la malla 50.¹¹

3.3.2 Prueba de redondez y esfericidad. Redondez y esfericidad de las partículas de propantes son propiedades que pueden afectar al rendimiento debido al tipo de empaque de material apuntalante. La esfericidad es una medida de que tanto la partícula apuntalante se acerca a la forma de una esfera. La redondez es una medida de la definición relativa de esquinas o de la curvatura.

¹¹ International Organization for Standardization (2006). Iso 13503-2 “measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations”

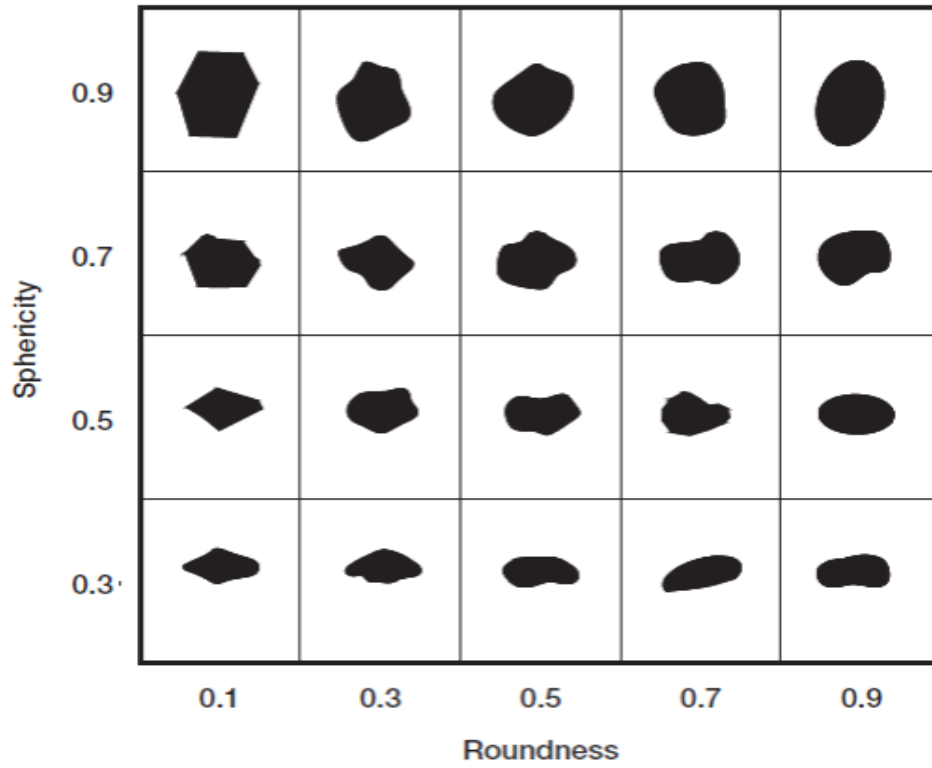
Su importancia depende nivel de estrés en el que el agente de sostén va ser utilizado. Debido a las tensiones de la superficie son más uniformes el bien redondeado, las partículas esféricas, son capaces de llevar a mayores cargas de una partícula menos redondeada. Por lo tanto, en los niveles de estrés cada vez mayores, un mejor grado de redondez y esfericidad es preferible para un mejor empaquetamiento, menos trituración, y una mayor conductividad.

Robustez de granos, o angularidad, es una medida de la nitidez relativa de las esquinas del grano, y la redondez de las partículas es una medida del grado en que la forma de la partícula se aproxima a la forma de una esfera.

El método estándar para determinar la redondez y esfericidad se utiliza la tabla desarrollada por Krumbien y Sloos (Krumbien y Sloos, 1963), como se muestra en la fig.16. La norma ISO13503-2 requiere el uso de un microscopio para evaluar la redondez y esfericidad de mínimo 20 partículas, y los valores deben ser promediados. La redondez y esfericidad deben evaluarse por separado. La ISO 13503-2 sugiere que los propantes naturales (arenas) su redondez y esfericidad debe ser mayor a 0,7, mientras que para los propantes cerámicos deben ser de 0,9.¹²

¹² International Organization for Standardization(2006). Iso 13503-2 “measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations”.

Figura 10. Carta de esfericidad y redondez por Krumbien y Sloos



Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

3.3.3 Prueba de gravedad específica y densidad. La densidad aparente se mide mediante el vertido de una muestra de material propante a través de un embudo para llenar un cilindro de bronce calibrado y con un volumen conocido. El material propante que se agregó para llenar el cilindro se pesa y el valor es dividido por el volumen conocido para llegar al valor de la densidad aparente.

La medición de la gravedad específica se realiza mediante un picnómetro, en donde un líquido o gas se utiliza para llenar el volumen de los poros de una masa conocida de material propante.¹³

¹³ ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

Figura 11. Densidad bulk y gravedad específica aparente

| Proppant | Bulk Density | Apparent Specific Gravity |
|--|--------------|---------------------------|
| Ottawa Sand 20/40 | 1.60 | 2.65 |
| Ottawa Sand, 40/70 | 1.58 | 2.65 |
| Brady Sand, 8/12 | 1.60 | 2.65 |
| Pre-Cure RC Sand, 20/40 | 1.59 | 2.45 |
| Curable RC Sand, 20/40 | 1.53 | 2.55 |
| LW Ceramic, 20/40 | 1.57 | 2.71 |
| ISP, 20/40 | 1.88 | 3.27 |
| Sintered Bauxite, 20/40 | 2.00 | 3.55 |
| ULWP ($\gamma_{prop} = 1.25$), 14/30 | 0.84 | 1.25 |
| ULWP ($\gamma_{prop} = 1.05$), 14/40 | 0.66 | 1.05 |

Fuente: ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

3.3.4 Calidad del material propante.

3.3.4.1 Prueba de solubilidad en ácidos: La evaluación de la solubilidad en ácidos se utiliza para determinar la idoneidad del material propante para su uso en aplicaciones donde pueda entrar en contacto con ácidos.

Esta técnica también puede ser útil para indicar la cantidad de materiales solubles (Es decir, carbonatos, feldespatos, óxidos de hierro, arcillas, etc.) presentes en el material propante. Los resultados de la solubilidad en ácidos es una función de la superficie del propante, el material propante de tamaños más pequeños tienen más superficie expuesta de reacción acida y por lo tanto se presenta un mayor porcentaje de solubilidad que las partículas más grandes.

La norma ISO 13502-2 establece para material propante 12:03 en HCL:HF (es decir, el 12% de la masa de HCL y el 3% de la masa de HF) en un periodo de 30 minutos a 150 °F. El resto de material propante se separa y se seca y luego se

compara el peso del material inicial con el material expuesto al ácido. Arenas de tamaño 6/10 a 30/50 debe tener al menos 2% de solubilidad. En la práctica la solubilidad en ácidos se debe considerar cuando hay expectativa de la necesidad de reparación con tratamientos ácidos.

3.3.4.2 Prueba de aplastamiento: La prueba de resistencia al aplastamiento se lleva a cabo a una muestra de material propante para determinar la cantidad de material aplastado por un esfuerzo determinado. Esta prueba es útil para determinar y comparar la resistencia al aplastamiento del material propante. Según la norma la prueba debe llevarse a cabo sobre muestras que ha sido tamizada de manera que todas las partículas que se evalúan sean de un tamaño específico para un área de distribución.

La cantidad de material triturado de cada muestra con cada nivel de presión se cuantifica. La evaluación de estos resultados puede ser un indicativo del nivel de estrés en el que la trituración es excesiva y la tensión máxima a la que el material debe ser expuesto.

El primer paso del procedimiento consiste en extraer el material que está fuera de los márgenes superior e inferior del tamiz. Según especificaciones del tamiz hasta un 10% del material puede estar fuera de rango dado. Es importante retirar este material antes de que el material sea objeto de ensayos con el fin de obtener repetitividad.

Los procedimientos de la prueba estándar para medir el aplastamiento implican un volumen de carga pre-establecido de material propante en una celda que posee un pistón flotante de 2 pulgadas de diámetro. (En procedimientos estándar anteriores no se definía el diámetro del pistón). La celda de carga es entonces colocada en una prensa hidráulica para aplicar una carga directa en los granos del material propante con un aumento de presión controlada de 2.000 psi/min hasta

llegar a la presión deseada, después de lo cual la presión final se mantiene por dos minutos. Finalmente la muestra se tamiza para determinar la cantidad de material triturado y se mide el peso de material triturado.¹⁴

¹⁴ ECONOMIDES, Michael (2007). Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production.

4. EVALUACION DE CANTERAS PARA USO EN LA INDUSTRIA PETOLERA COMO MATERIAL PROPANTE.

Para la fabricación de material propante se usan arenas con alto contenido de alfa cuarzo y el beta cuarzo, siendo el primero de estos el de mejor calidad, ya que cristaliza en una estatura rómbica que garantiza una arena de grano más fuerte y el segundo en una estructura hexagonal.

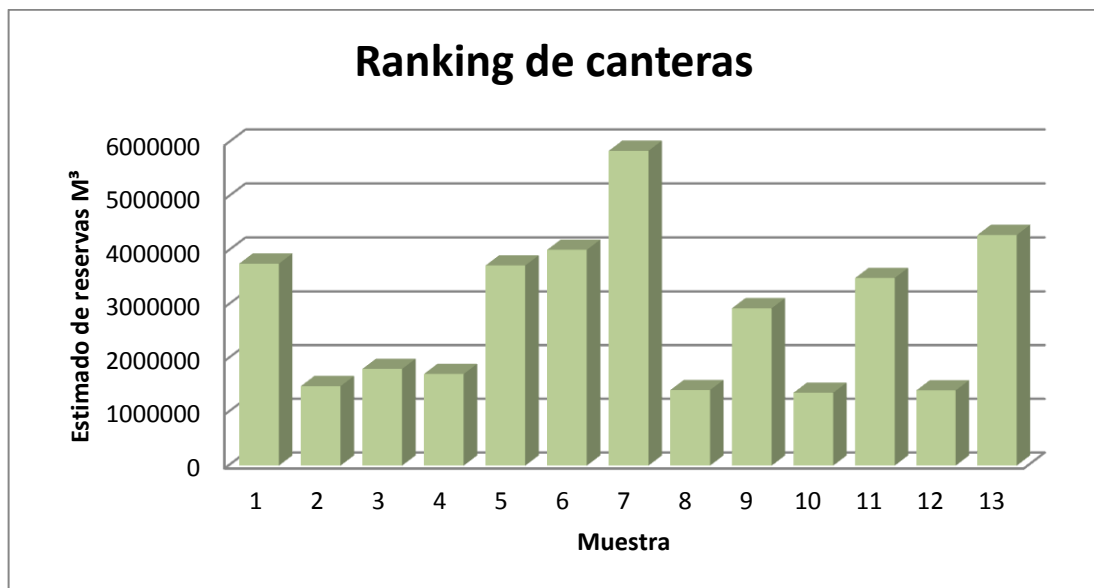
Para la obtención de muestras de arena que pudiesen servir para la fabricación de material propante se partió de una base de datos existente de Ecopetrol, donde se relacionan canteras, tipo de material, coordenadas, y estimado de la cantidad de material presente.

4.1 FASE 1: SELECCIÓN PRELIMINAR DE CANTERAS PARA MUESTREO.

Teniendo en cuenta esta información se procedió a seleccionar un grupo de canteras tomando como criterios, la cantidad de material que pueda servir para la fabricación de material propante y la presencia de arcilla. La presencia de arcilla es un factor muy importante a tener en cuenta por que la presencia en mayor medida de esta, afecta directamente los costos de producción.

Después de este proceso se procedió a la recolección de muestras, se obtuvieron, 13 en las cercanías de Barrancabermeja.

Figura 12. Raking de canteras







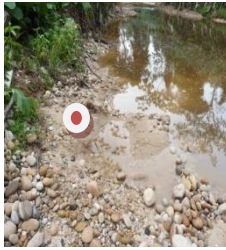




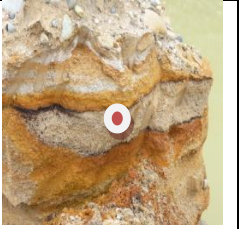
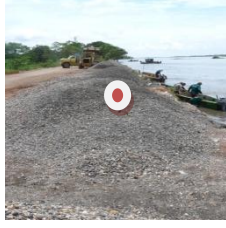
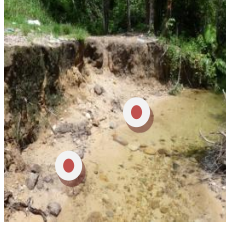












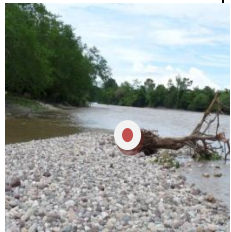
Fuente: Autor


La mayoría de las canteras poseen reservas superior a 1,500,000 m³ suficiente para abastecer la demanda por al menos 10 años

Tabla 3. Informe de recolección de muestras

| Muestra | Coordenadas | | Nombre | Fotos |
|---------|-------------|----------|--------------------------|-------|
| | Norte | Este | | |
| 1 | 1027403 | 1272777 | Pozo Siete | |
| 2 | 1029957 | 12668662 | Recerbera Enrique Gaitan | |

| Muestra | Coordenadas | | Nombre | Fotos | | |
|---------|--|-------------|---------------------------------------|--|---|---|
| | Norte | Este | | | | |
| 3 | 102978 3 | 127120 1 | Recebera Olga Lucia Plata |  |  |  |
| 4 | 103144 04 | 127115 0 | Recebera La Variante |  |  |  |
| 5 | Via Barranca- Bucaramanga Km 29-30 12Km a mano izq. | | Recebera San Rafael |  |  |  |
| 6 | 105749 7 | 128295 2 | |  |  |  |
| 7 | 101931 4 | 130536 1 | Rio Magdalena Puerto Wilches |  | | |
| 8 | 102461 6 | 130199 1 | |  |  | |

| Muestra | Coordenadas | | Nombre | Fotos | |
|---------|-------------|-------------|---|--|--|
| | Norte | Este | | | |
| 9 | 104554 5 | 129280 4 | Desembocadura de la Quebrada la Cayumba |  |  |
| 10 | 103222 1 | 129282 4 | Puente Ferreo |  |  No se obtuvo muestra ya que el rio Sogamoso estaba bastante crecido a sus laderas arcilla y lodo |
| 11 | 105714 9 | 128576 8 | Puente Payoa |  |  |
| 12 | 105732 6 | 128464 7 | Caño El Cedro |  |  |
| 13 | 107215 1 | 127821 8 | Represa de Sogamoso |  |  |

 Punto donde se tomó la muestra.

Fuente: Ecopetrol. Informe fabricación de material propante a nivel local Rubén Castillo.

Además de estas se obtuvieron muestras de plantas productoras de arena ya en funcionamiento para otras industrias como la del vidrio.

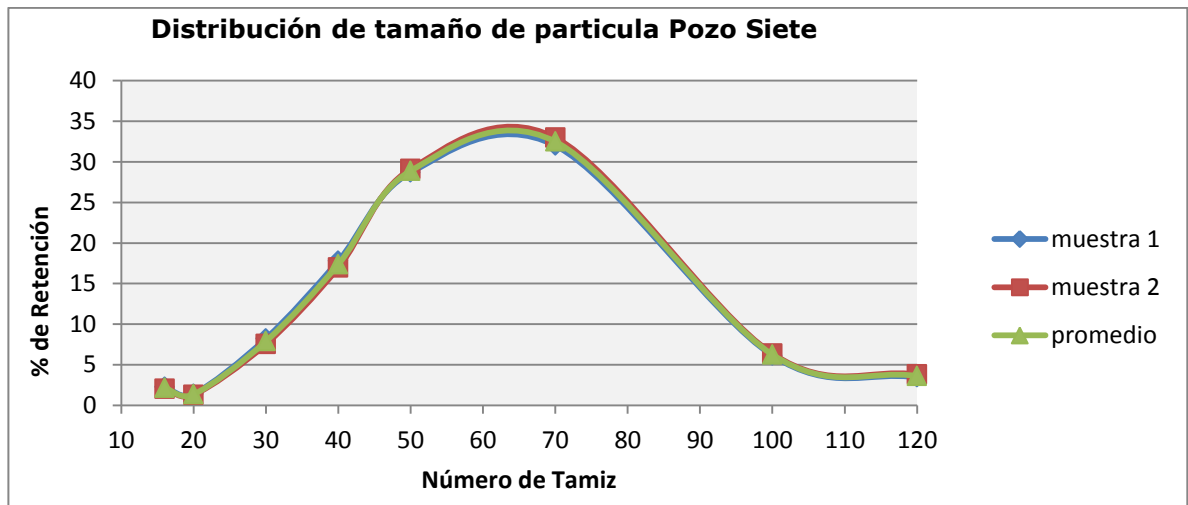
- Canteras las moyas
- Peñas blancas mina San Andrés
- Arenas Marcelo Arango
- Arenas Doradas
- Mina Benicio

4.2 FASE 2: ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN

El objetivo primordial de este estudio es identificar el o los tamaño predominante de partícula presente en cada muestra, en total para el análisis de distribución se tomaron 18 muestras, para el desarrollo de esta muestra se tuvieron en cuenta 7 tamaños de tamiz, (16, 20, 30,40, 50, 70, 100), a continuación se muestran tablas donde se observa la distribución predominante:

- Distribución muestra 1

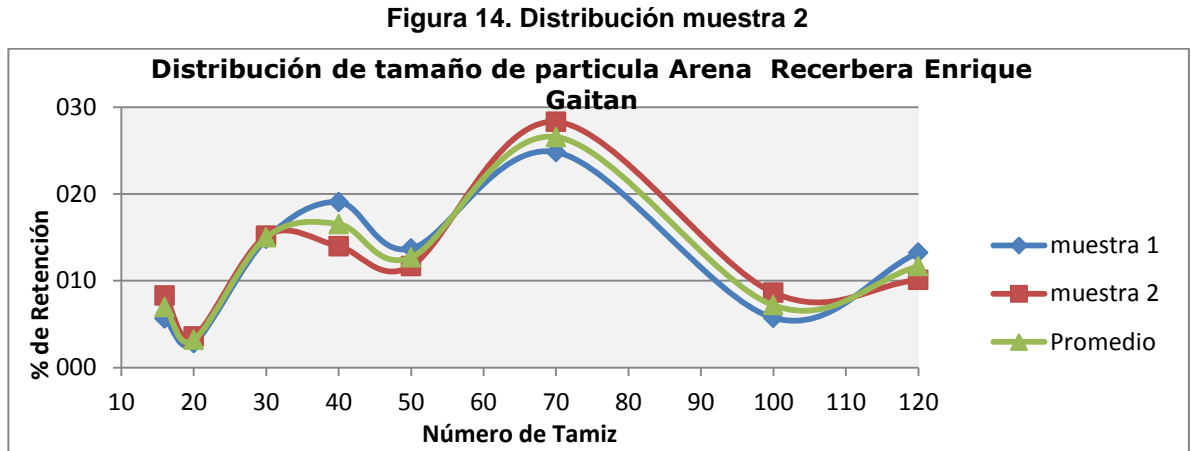
Figura 13. Distribución muestra 1



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 40/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

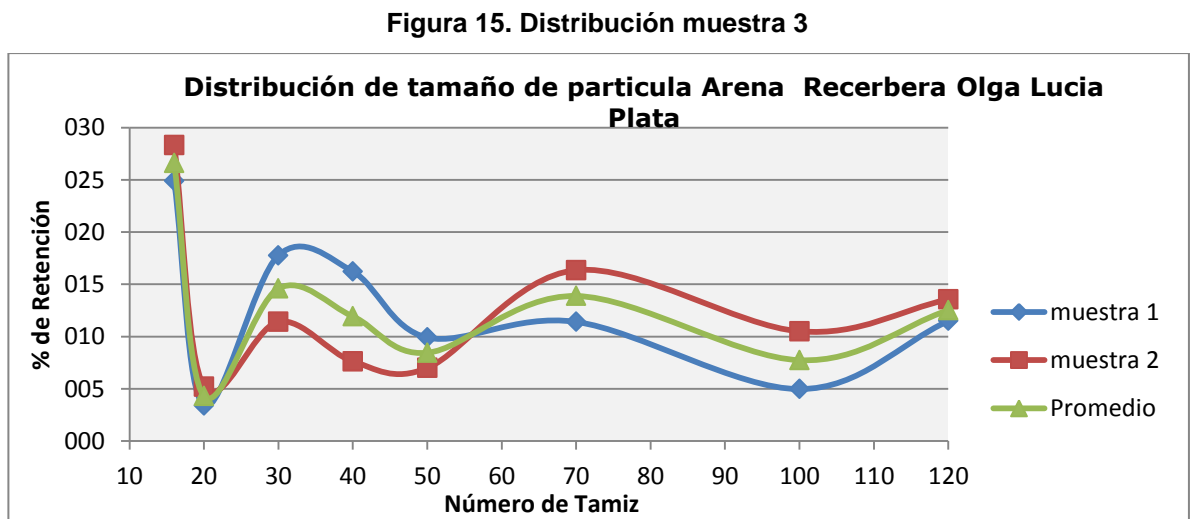
- Distribución muestra 2



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 40/70. Concepto: no pasa a la siguiente fase, problemas de desconsolidaban, dando como resultado alto porcentaje de finos.

- Distribución muestra 3

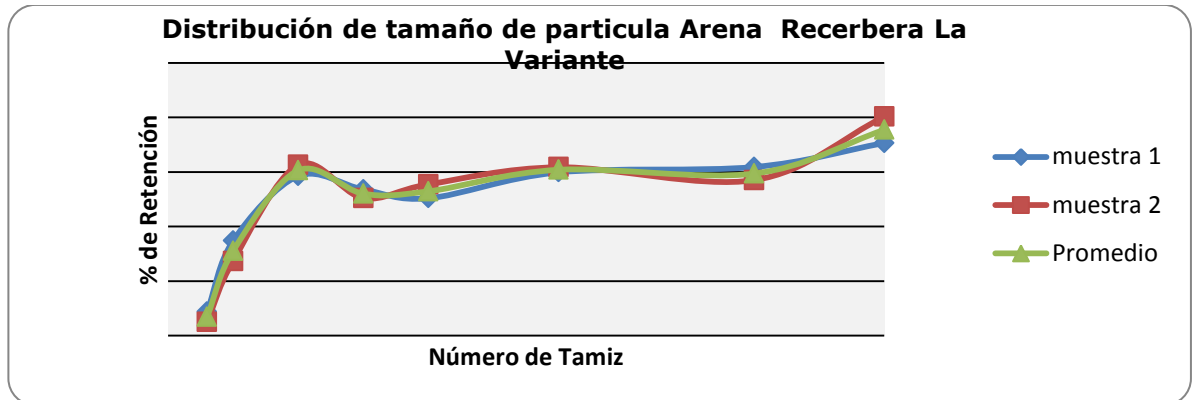


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

No hay una distribución predominante por la cantidad de arena retenida en cada uno de los platos no supera el 30%. Concepto: no pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 4

Figura 16. Distribución muestra 4

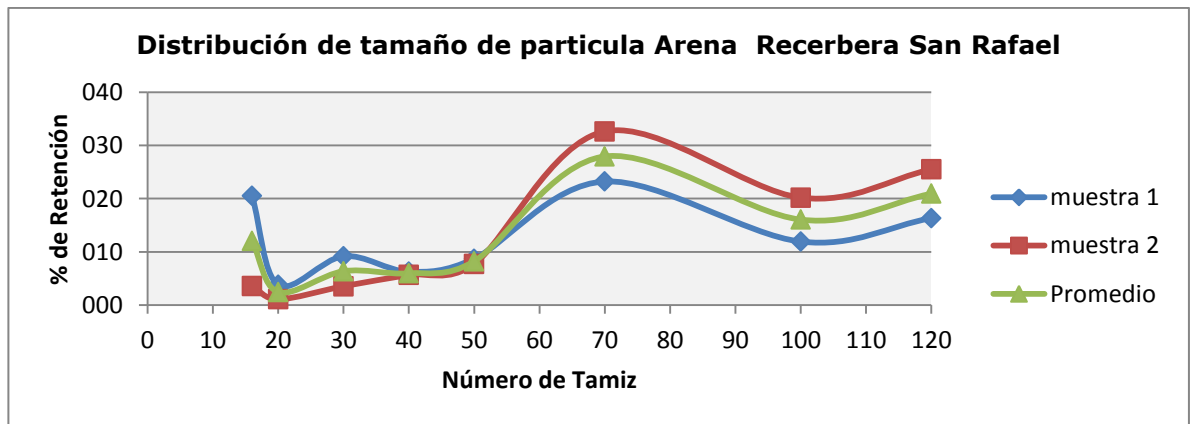


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

No hay una distribución predominante por la cantidad de arena retenida en cada uno de los platos no supera el 30%. Concepto: no pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 5

Figura 17. Distribución muestra 5

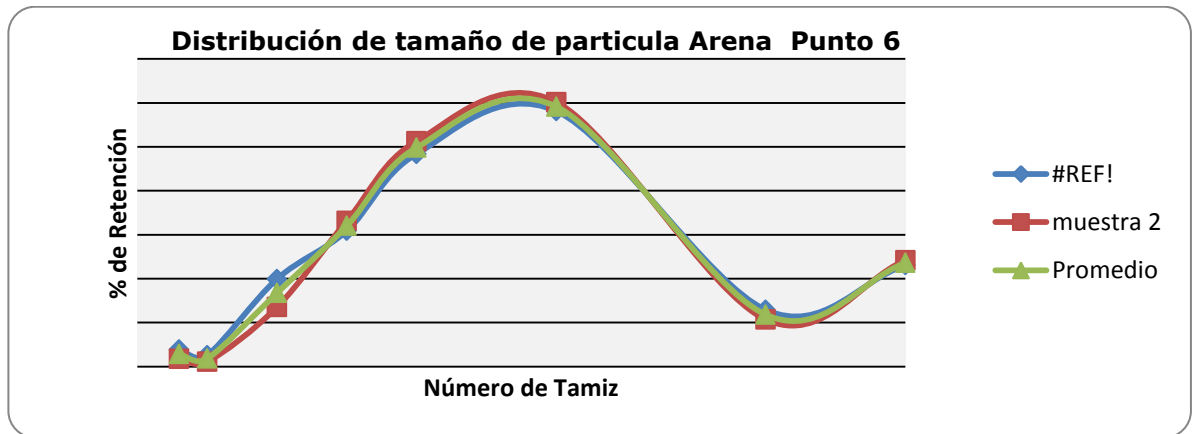


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 50/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 6

Figura 18. Distribución muestra 6

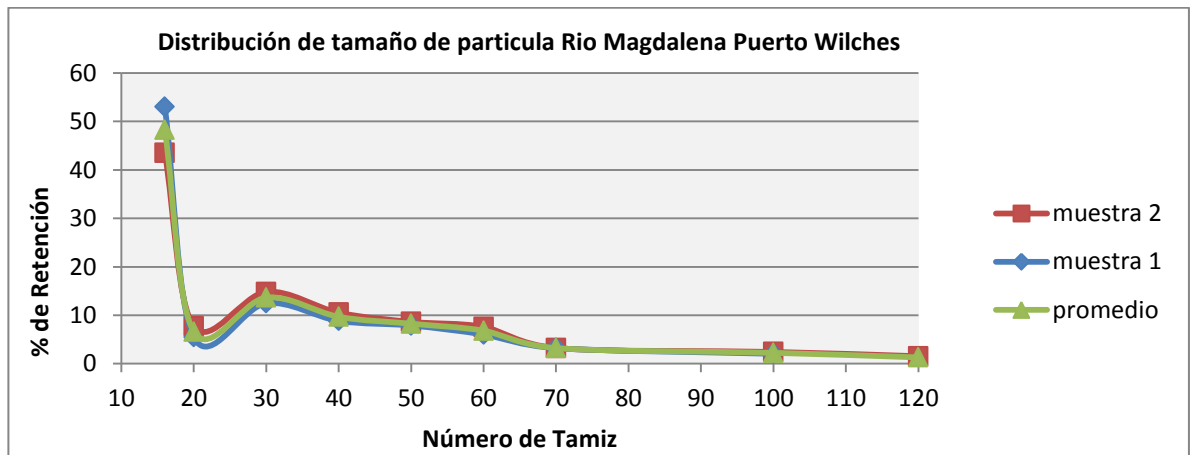


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 40/70. Concepto no pasa a la siguiente fase. Problemas de desconsolidaban, dando como resultado alto porcentaje de finos.

- Distribución muestra 7

Figura 19. Distribución muestra 7

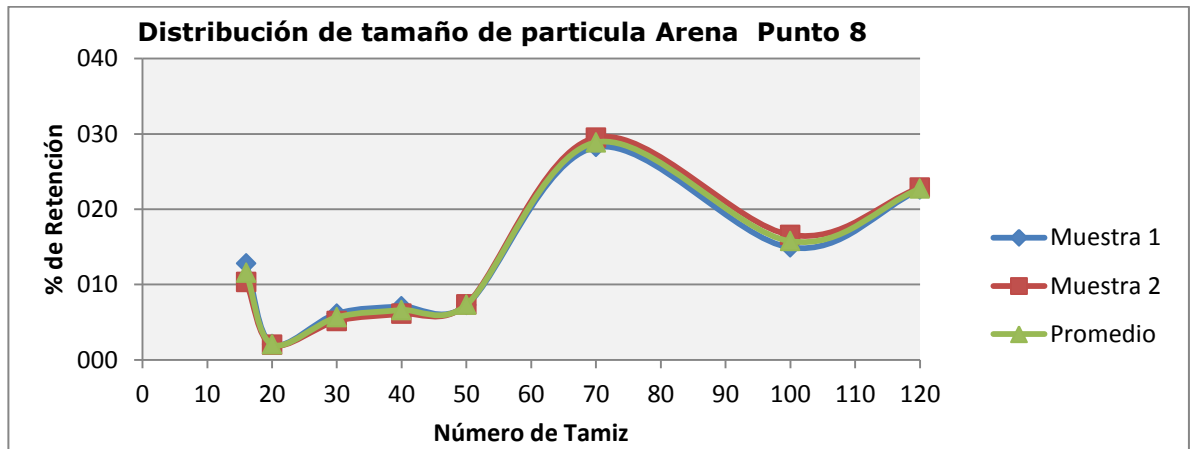


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 20/40. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 8

Figura 20. Distribución muestra 8

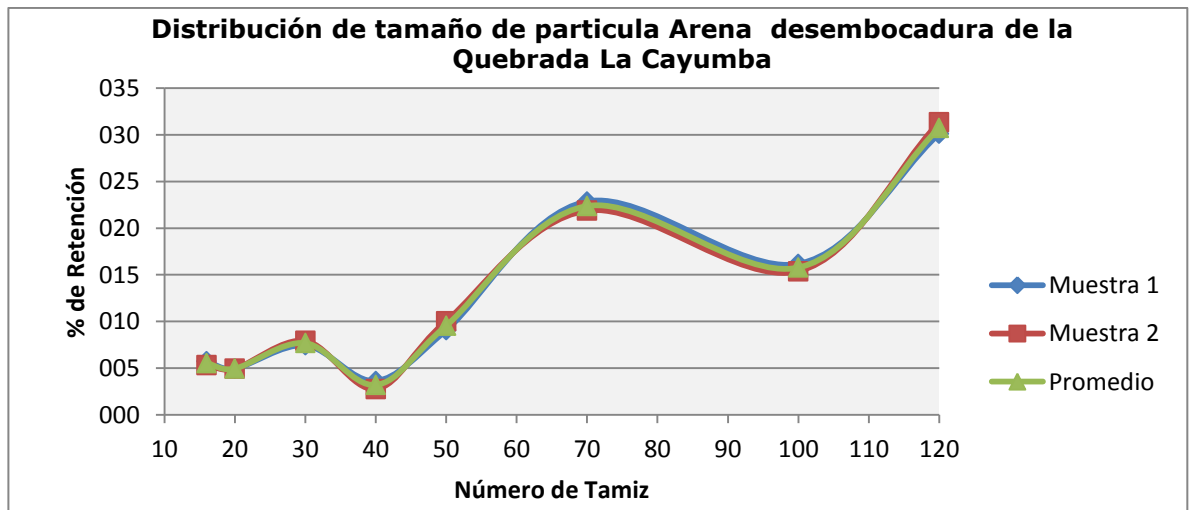


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 40/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 9

Figura 21. Distribución muestra 9

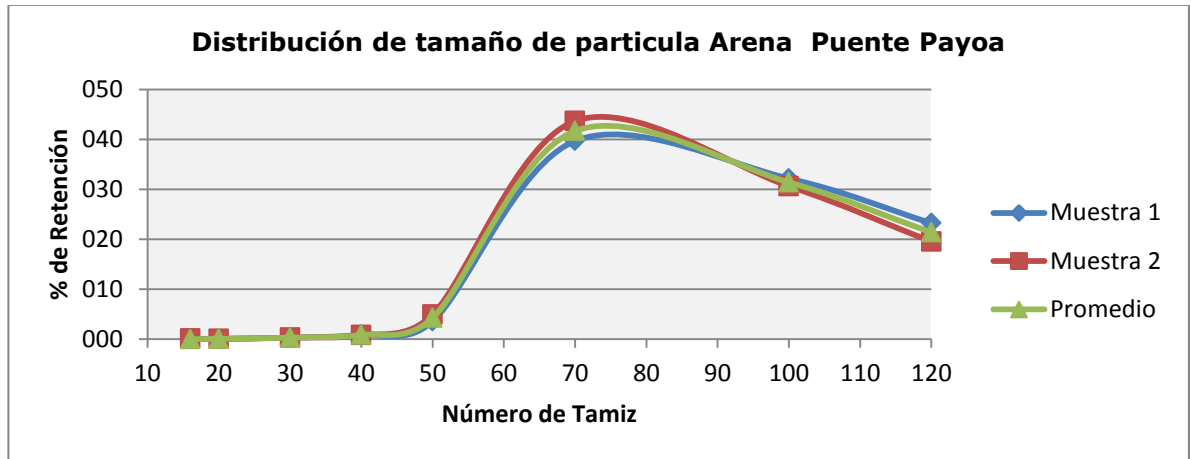


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 50/70. Problemas de desconsolidaban, dando como resultado alto porcentaje de finos.

- Distribución muestra 11

Figura 22. Distribución muestra 11

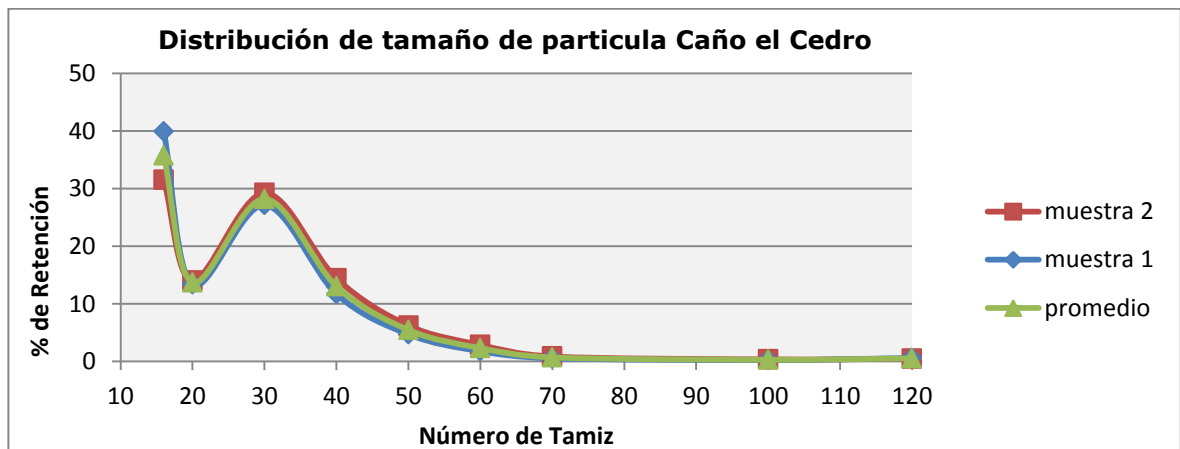


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 50/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 12

Figura 23. Distribución muestra 12

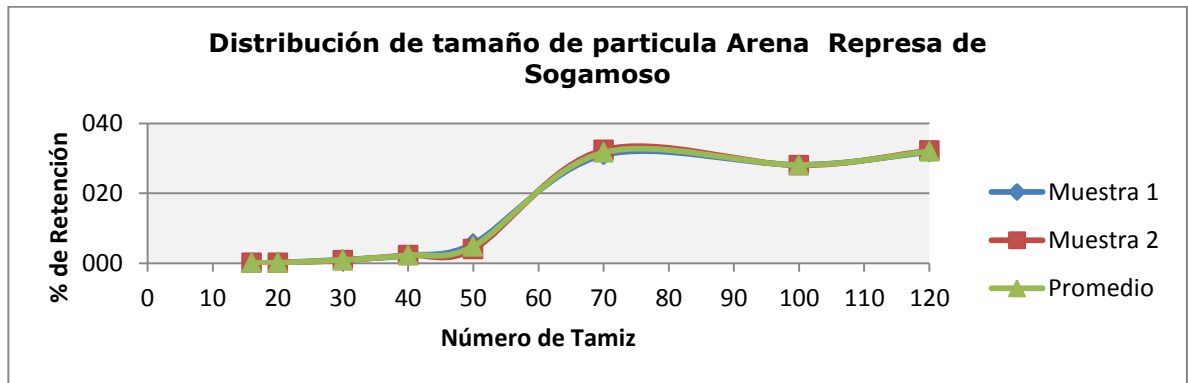


Fuente: Autor

Distribución predominante 20/40. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra 13

Figura 24. Distribución muestra 13



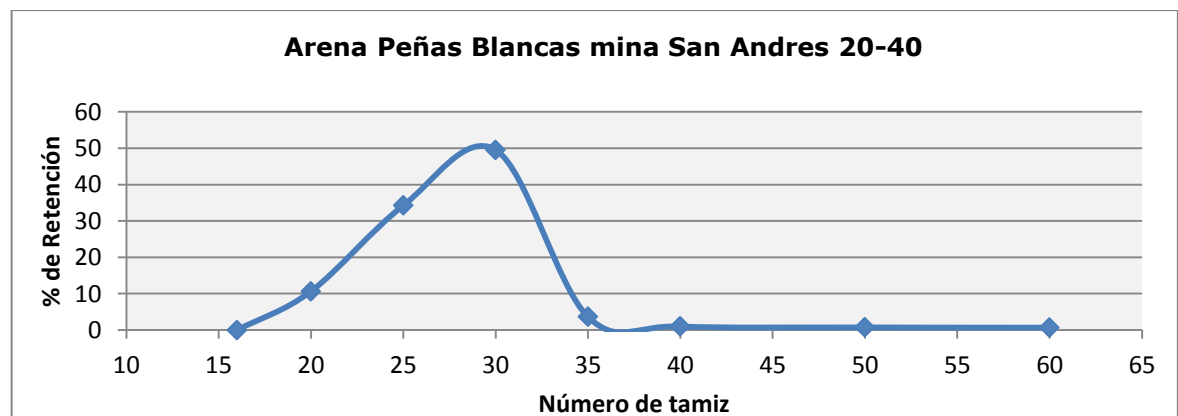
Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 50/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Peñas blancas mina San Andrés

Estas muestras se recibieron separadas en tres tamaños de malla diferentes 20/40, 30/50, y 40/70, al igual que las demás se procedió a examinar la distribución.

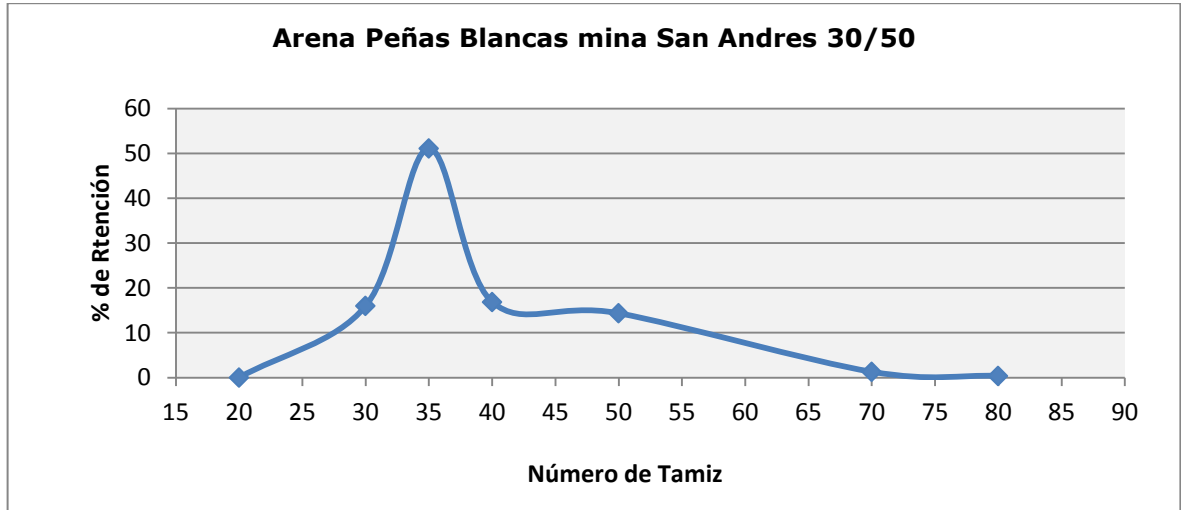
Figura 25. Distribución 20/40



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase.

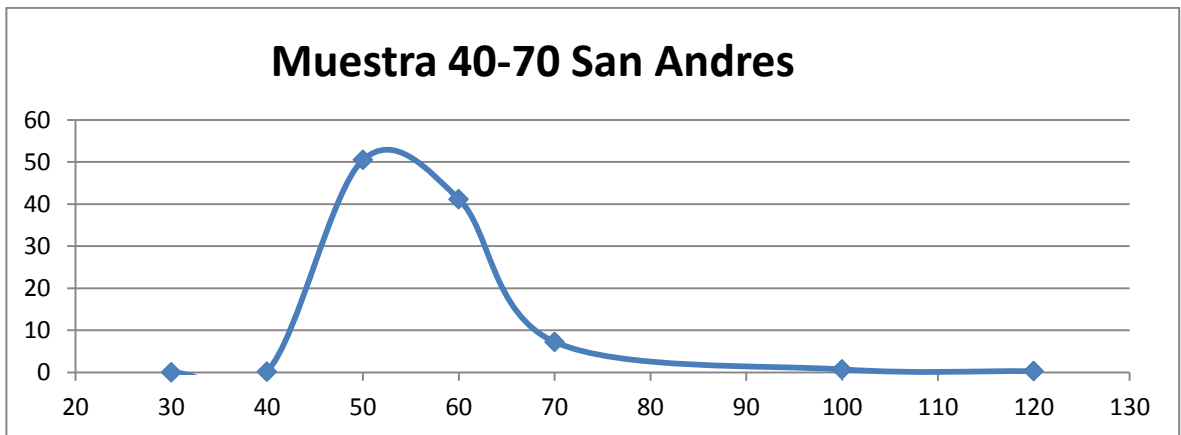
Figura 26. Distribución 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase.

Figura 27. Distribución 40/70

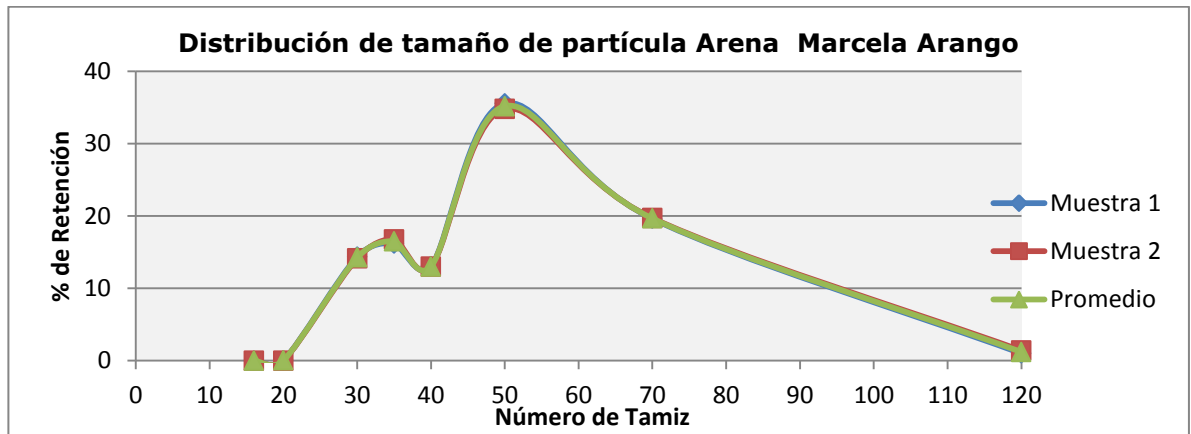


Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra Marcelo Arango 1

Figura 28. Distribución Marcelo Arango

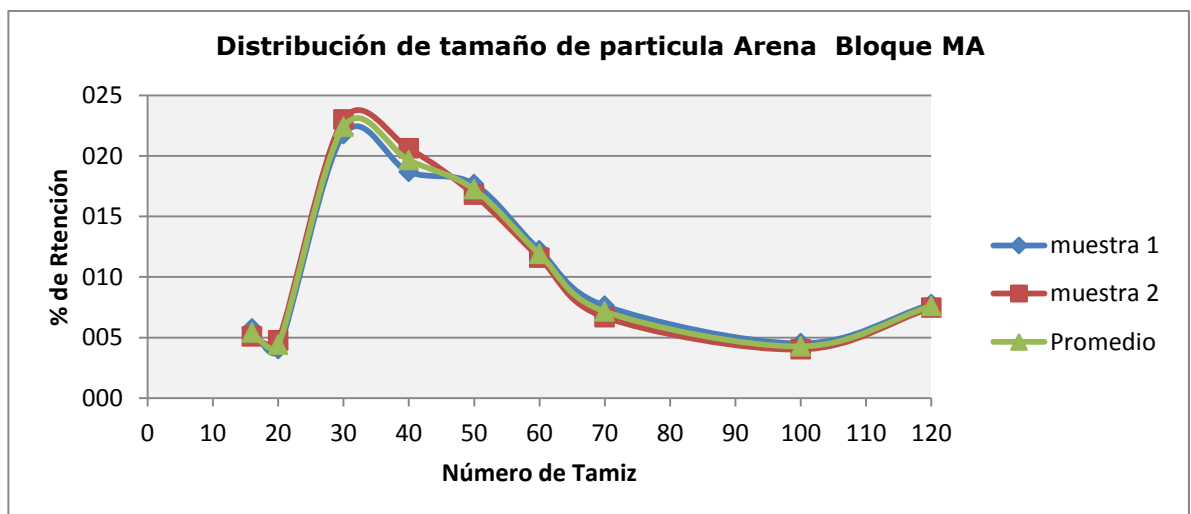


Fuente: Autor

Distribución predominante 40/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución muestra bloque Marcelo Arango 2

Figura 29. Distribución Bloque Marcelo Arango 2

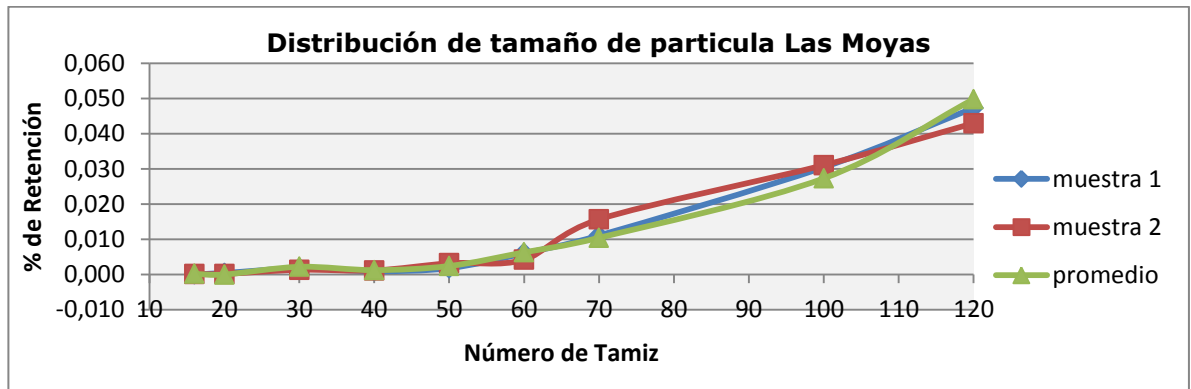


Fuente: Autor

Distribución predominante 30/50. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución mina Las Moyas

Figura 30. Distribución mina Las Moyas

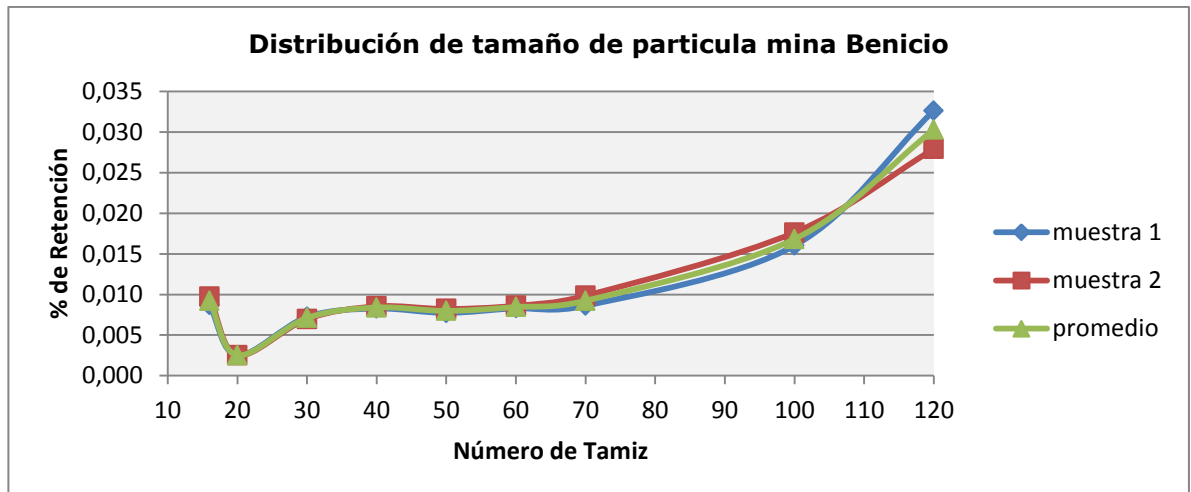


Fuente: Autor

Distribución predominante 40/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución mina Benicio

Figura 31. Distribución mina Benicio

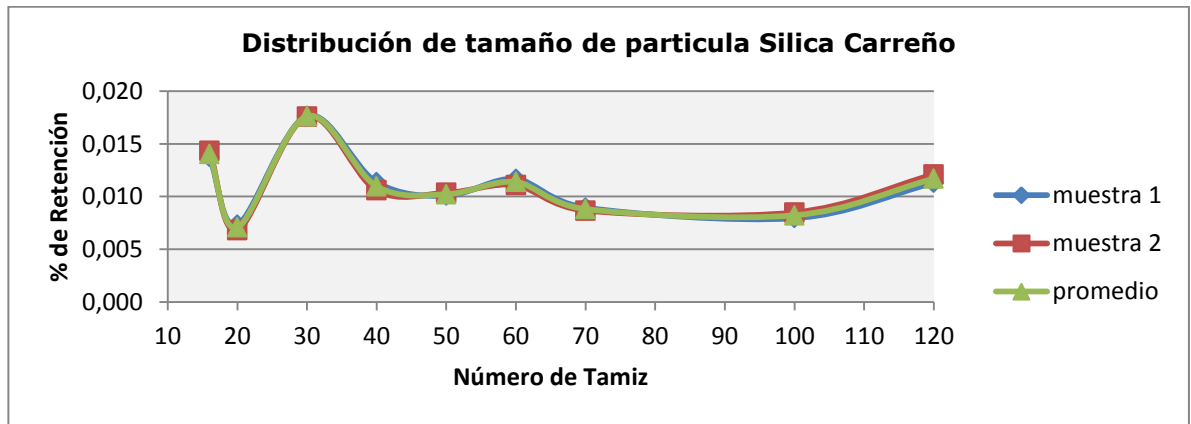


Fuente: Autor

Distribución predominante 40/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución mina Silíceo Carreño

Figura 32. Distribución Silíceo Carreño

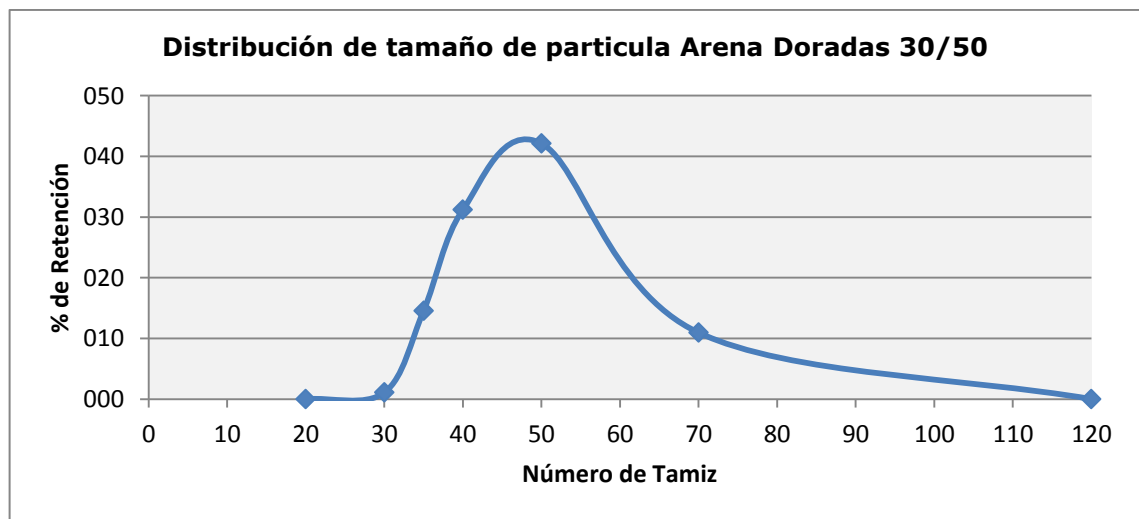


Fuente: Autor

Distribución predominante 20/40 y 40/70. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Distribución Mina Arenas Doradas 30/50

Figura 33. Distribución Mina Arenas Doradas 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Distribución predominante 30/50. Concepto: pasa a la siguiente fase.

4.3 FASE 3: ESFERICIDAD Y REDONDEZ

La prueba de redondez y esfericidad tienen como propósito evaluar la forma y geometría de las muestras. La esfericidad es una medida de que tanto se aproxima una partícula a una esfera. La redondez es una medida relativa de la forma en cuanto a las esquinas y curvaturas de una partícula.

Para determinar la esfericidad y redondez de las diferentes muestras de material de empaquetamiento, se tomaron al azar 20 granos de la muestra a evaluar. Cada grano se colocó en una cuadrícula de papel milimetrado y se les tomó fotografías ampliadas 30 veces. Posteriormente, cada fotografía se comparó con el diagrama visual de Krumbien/Sloss (recomendada según la práctica recomendada API RP*19C ISO 13503-2) para estimar la esfericidad y redondez de cada grano. La ISO 13503-2 sugiere que los propantes naturales (arenas) su redondez y esfericidad debe ser mayor a 0,7.

Para esta fase no se tuvieron en cuenta para algunas muestras ya que una vez realizado el tamizado las partículas que quedaban en los diferentes tamaños de tamiz se desconsolidaban, dando como resultado un muy alto porcentaje de finos.

- Esfericidad y redondez muestra 1.

Tabla 4. Evaluación de esfericidad y redondez pozo siete.

| Pozo Siete | | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,5 |
| 1-B | 0,7 | 0,5 |
| 1-C | 0,7 | 0,5 |
| 1-D | 0,7 | 0,3 |
| 1-E | 0,9 | 0,7 |
| 2-A | 0,9 | 0,5 |
| 2-B | 0,5 | 0,7 |
| 2-C | 0,7 | 0,3 |
| 2-D | 0,5 | 0,5 |
| 2-E | 0,5 | 0,3 |
| 3-A | 0,7 | 0,3 |
| 3-B | 0,9 | 0,3 |
| 3-C | 0,5 | 0,7 |
| 3-D | 0,7 | 0,1 |
| 3-E | 0,9 | 0,3 |
| 4-A | 0,7 | 0,3 |
| 4-B | 0,5 | 0,5 |
| 4-C | 0,7 | 0,5 |
| 4-D | 0,9 | 0,3 |
| 4-E | 0,3 | 0,7 |
| PROM. | 0,7 | 0,4 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.4. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra 5.

Tabla 5. Evaluación de esfericidad y redondez recerbera San Rafael

| Arena Recerbera San Rafael | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,7 | 0,9 |
| 1-B | 0,9 | 0,7 |
| 1-C | 0,7 | 0,5 |
| 1-D | 0,7 | 0,5 |
| 1-E | 0,5 | 0,3 |
| 2-A | 0,7 | 0,3 |
| 2-B | 0,9 | 0,5 |
| 2-C | 0,3 | 0,7 |
| 2-D | 0,5 | 0,7 |
| 2-E | 0,5 | 0,3 |
| 3-A | 0,9 | 0,5 |
| 3-B | 0,9 | 0,7 |
| 3-C | 0,5 | 0,3 |
| 3-D | 0,7 | 0,3 |
| 3-E | 0,3 | 0,5 |
| 4-A | 0,5 | 0,7 |
| 4-B | 0,7 | 0,9 |
| 4-C | 0,9 | 0,5 |
| 4-D | 0,9 | 0,7 |
| 4-E | 0,5 | 0,1 |
| PROM. | 0,7 | 0,5 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.5. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra 8.

Tabla 6. Evaluación de esfericidad y redondez arena punto 8.

| Arena Punto 8 | | | | | |
|---------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,7 | 0,3 |
| 1-B | 0,5 | 0,7 |
| 1-C | 0,7 | 0,3 |
| 1-D | 0,5 | 0,3 |
| 1-E | 0,9 | 0,7 |
| 2-A | 0,7 | 0,5 |
| 2-B | 0,9 | 0,9 |
| 2-C | 0,9 | 0,7 |
| 2-D | 0,9 | 0,5 |
| 2-E | 0,3 | 0,1 |
| 3-A | 0,7 | 0,9 |
| 3-B | 0,5 | 0,3 |
| 3-C | 0,7 | 0,3 |
| 3-D | 0,9 | 0,5 |
| 3-E | 0,3 | 0,5 |
| 4-A | 0,7 | 0,7 |
| 4-B | 0,9 | 0,5 |
| 4-C | 0,5 | 0,5 |
| 4-D | 0,9 | 0,5 |
| 4-E | 0,7 | 0,3 |
| PROM. | 0,7 | 0,5 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.5. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra 11.

Tabla 7. Evaluación de esfericidad y redondez arena puente Payoa

| Arena Puente Payoa | | | | | |
|--------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,3 |
| 1-B | 0,5 | 0,3 |
| 1-C | 0,5 | 0,7 |
| 1-D | 0,7 | 0,5 |
| 1-E | 0,9 | 0,7 |
| 2-A | 0,7 | 0,5 |
| 2-B | 0,7 | 0,5 |
| 2-C | 0,7 | 0,3 |
| 2-D | 0,9 | 0,3 |
| 2-E | 0,5 | 0,5 |
| 3-A | 0,5 | 0,3 |
| 3-B | 0,5 | 0,7 |
| 3-C | 0,9 | 0,5 |
| 3-D | 0,9 | 0,3 |
| 3-E | 0,9 | 0,7 |
| 4-A | 0,9 | 0,5 |
| 4-B | 0,9 | 0,7 |
| 4-C | 0,5 | 0,7 |
| 4-D | 0,5 | 0,9 |
| 4-E | 0,7 | 0,9 |
| PROM. | 0,7 | 0,5 |

Fuente: Ecopetrol

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.5. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra 13.

Tabla 8. Evaluación de esfericidad y redondez Represa de Sogamoso

| Arena Recerbera San Rafael | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,7 | 0,9 |
| 1-B | 0,9 | 0,7 |
| 1-C | 0,7 | 0,5 |
| 1-D | 0,7 | 0,5 |
| 1-E | 0,5 | 0,3 |
| 2-A | 0,7 | 0,3 |
| 2-B | 0,9 | 0,5 |
| 2-C | 0,3 | 0,7 |
| 2-D | 0,5 | 0,7 |
| 2-E | 0,5 | 0,3 |
| 3-A | 0,9 | 0,5 |
| 3-B | 0,9 | 0,7 |
| 3-C | 0,5 | 0,3 |
| 3-D | 0,7 | 0,3 |
| 3-E | 0,3 | 0,5 |
| 4-A | 0,5 | 0,7 |
| 4-B | 0,7 | 0,9 |
| 4-C | 0,9 | 0,5 |
| 4-D | 0,9 | 0,7 |
| 4-E | 0,5 | 0,1 |
| PROM. | 0,7 | 0,5 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.5. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra 7.

Tabla 9. Evaluación de esfericidad y redondez Rio Mag. Pto Wilches

| Arena Rio Magdalena Puerto Wilches | | | | | |
|------------------------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,5 |
| 1-B | 0,9 | 0,7 |
| 1-C | 0,7 | 0,5 |
| 1-D | 0,7 | 0,3 |
| 1-E | 0,7 | 0,5 |
| 2-A | 0,7 | 0,3 |
| 2-B | 0,5 | 0,3 |
| 2-C | 0,3 | 0,5 |
| 2-D | 0,7 | 0,1 |
| 2-E | 0,7 | 0,9 |
| 3-A | 0,7 | 0,7 |
| 3-B | 0,3 | 0,9 |
| 3-C | 0,5 | 0,3 |
| 3-D | 0,9 | 0,5 |
| 3-E | 0,7 | 0,3 |
| 4-A | 0,5 | 0,3 |
| 4-B | 0,9 | 0,5 |
| 4-C | 0,5 | 0,3 |
| 4-D | 0,9 | 0,3 |
| 4-E | 0,9 | 0,5 |
| PROM. | 0,7 | 0,5 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.5. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra 12.

Tabla 10. Evaluación de esfericidad y redondez Caño el Cedro.

| Arena Caño el Cedro | | | | | |
|---------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,7 | 0,3 |
| 1-B | 0,7 | 0,5 |
| 1-C | 0,5 | 0,5 |
| 1-D | 0,3 | 0,3 |
| 1-E | 0,7 | 0,5 |
| 2-A | 0,7 | 0,7 |
| 2-B | 0,3 | 0,1 |
| 2-C | 0,5 | 0,5 |
| 2-D | 0,5 | 0,7 |
| 2-E | 0,5 | 0,5 |
| 3-A | 0,9 | 0,5 |
| 3-B | 0,9 | 0,3 |
| 3-C | 0,9 | 0,5 |
| 3-D | 0,7 | 0,5 |
| 3-E | 0,3 | 0,5 |
| 4-A | 0,9 | 0,7 |
| 4-B | 0,9 | 0,3 |
| 4-C | 0,3 | 0,5 |
| 4-D | 0,9 | 0,7 |
| 4-E | 0,3 | 0,1 |
| PROM. | 0,6 | 0,5 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.6, Redondez: 0.5. Concepto: descartada por redondez.

- Esfericidad y redondez muestra mina Benicio.

Tabla 11. Evaluación de esfericidad y redondez Mina Benicio

| Mina Benicio | | | | | |
|--------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,3 | 0,5 |
| 1-B | 0,9 | 0,5 |
| 1-C | 0,9 | 0,7 |
| 1-D | 0,7 | 0,5 |
| 1-E | 0,7 | 0,5 |
| 2-A | 0,7 | 0,9 |
| 2-B | 0,5 | 0,3 |
| 2-C | 0,3 | 0,9 |
| 2-D | 0,5 | 0,3 |
| 2-E | 0,9 | 0,7 |
| 3-A | 0,7 | 0,9 |
| 3-B | 0,7 | 0,5 |
| 3-C | 0,5 | 0,7 |
| 3-D | 0,7 | 0,3 |
| 3-E | 0,5 | 0,3 |
| 4-A | 0,9 | 0,5 |
| 4-B | 0,5 | 0,5 |
| 4-C | 0,7 | 0,3 |
| 4-D | 0,9 | 0,7 |
| 4-E | 0,7 | 0,9 |
| PROM. | 0,7 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Mina Puerto Carreño 20/40.

Tabla 12. Evaluación de esfericidad y redondez Mina Puerto Carreño.

| Mina Carreño | | | | | |
|--------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,7 |
| 1-B | 0,9 | 0,7 |
| 1-C | 0,9 | 0,7 |
| 1-D | 0,9 | 0,3 |
| 1-E | 0,5 | 0,3 |
| 2-A | 0,7 | 0,9 |
| 2-B | 0,9 | 0,5 |
| 2-C | 0,9 | 0,5 |
| 2-D | 0,9 | 0,7 |
| 2-E | 0,9 | 0,7 |
| 3-A | 0,9 | 0,7 |
| 3-B | 0,7 | 0,3 |
| 3-C | 0,5 | 0,7 |
| 3-D | 0,9 | 0,7 |
| 3-E | 0,3 | 0,1 |
| 4-A | 0,9 | 0,7 |
| 4-B | 0,7 | 0,3 |
| 4-C | 0,7 | 0,9 |
| 4-D | 0,9 | 0,7 |
| 4-E | 0,7 | 0,5 |
| PROM. | 0,8 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.8, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Mina Las Moyas.

Tabla 13. Evaluación de esfericidad y redondez Mina Las Moyas

| Mina Las Moyas | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,7 |
| 1-B | 0,7 | 0,7 |
| 1-C | 0,9 | 0,7 |
| 1-D | 0,9 | 0,5 |
| 1-E | 0,9 | 0,7 |
| 2-A | 0,9 | 0,7 |
| 2-B | 0,5 | 0,7 |
| 2-C | 0,5 | 0,5 |
| 2-D | 0,9 | 0,5 |
| 2-E | 0,3 | 0,5 |
| 3-A | 0,5 | 0,5 |
| 3-B | 0,9 | 0,5 |
| 3-C | 0,9 | 0,5 |
| 3-D | 0,9 | 0,7 |
| 3-E | 0,7 | 0,9 |
| 4-A | 0,9 | 0,7 |
| 4-B | 0,9 | 0,5 |
| 4-C | 0,9 | 0,7 |
| 4-D | 0,7 | 0,5 |
| 4-E | 0,7 | 0,5 |
| PROM. | 0,8 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.8, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra arena Marcelo Arango 30/50.

Tabla 14. Evaluación de esfericidad y redondez Marcelo Arango 30/50.

| Arena Marcelo Arango 30/50 | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,5 |
| 1-B | 0,9 | 0,7 |
| 1-C | 0,9 | 0,7 |
| 1-D | 0,7 | 0,5 |
| 1-E | 0,7 | 0,9 |
| 2-A | 0,7 | 0,9 |
| 2-B | 0,7 | 0,5 |
| 2-C | 0,9 | 0,7 |
| 2-D | 0,9 | 0,7 |
| 2-E | 0,9 | 0,7 |
| 3-A | 0,7 | 0,5 |
| 3-B | 0,5 | 0,3 |
| 3-C | 0,5 | 0,5 |
| 3-D | 0,9 | 0,3 |
| 3-E | 0,9 | 0,7 |
| 4-A | 0,7 | 0,5 |
| 4-B | 0,9 | 0,7 |
| 4-C | 0,7 | 0,7 |
| 4-D | 0,7 | 0,3 |
| 4-E | 0,7 | 0,5 |
| PROM. | 0,8 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.8, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra arena Marcelo Arango 40/70.

Tabla 15. Evaluación de esfericidad y redondez Marcelo Arango 40/70.

| Arena Marcelo Arango 40/70 | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,5 |
| 1-B | 0,9 | 0,7 |
| 1-C | 0,9 | 0,7 |
| 1-D | 0,7 | 0,5 |
| 1-E | 0,7 | 0,9 |
| 2-A | 0,7 | 0,9 |
| 2-B | 0,7 | 0,5 |
| 2-C | 0,9 | 0,7 |
| 2-D | 0,9 | 0,7 |
| 2-E | 0,9 | 0,7 |
| 3-A | 0,7 | 0,5 |
| 3-B | 0,5 | 0,3 |
| 3-C | 0,5 | 0,5 |
| 3-D | 0,9 | 0,3 |
| 3-E | 0,9 | 0,7 |
| 4-A | 0,7 | 0,5 |
| 4-B | 0,9 | 0,7 |
| 4-C | 0,7 | 0,7 |
| 4-D | 0,7 | 0,3 |
| 4-E | 0,7 | 0,5 |
| PROM. | 0,8 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.8, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Arena Doradas 20/40.

Tabla 16. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Doradas 20/40.

| Arenas Doradas 20/40 | | | | | |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,7 | 0,5 |
| 1-B | 0,9 | 0,3 |
| 1-C | 0,7 | 0,3 |
| 1-D | 0,9 | 0,5 |
| 1-E | 0,3 | 0,7 |
| 2-A | 0,5 | 0,5 |
| 2-B | 0,9 | 0,5 |
| 2-C | 0,5 | 0,7 |
| 2-D | 0,5 | 0,7 |
| 2-E | 0,5 | 0,5 |
| 3-A | 0,9 | 0,9 |
| 3-B | 0,9 | 0,5 |
| 3-C | 0,5 | 0,5 |
| 3-D | 0,5 | 0,7 |
| 3-E | 0,7 | 0,3 |
| 4-A | 0,5 | 0,3 |
| 4-B | 0,9 | 0,7 |
| 4-C | 0,7 | 0,5 |
| 4-D | 0,7 | 0,5 |
| 4-E | 0,5 | 0,9 |
| PROM. | 0,7 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Arena Doradas 30/50.

Tabla 17. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Doradas 30/50.

| Arenas Doradas 30/50 | | | | | |
|----------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0,9 | 0,5 |
| 1-B | 0,5 | 0,5 |
| 1-C | 0,7 | 0,7 |
| 1-D | 0,5 | 0,7 |
| 1-E | 0,5 | 0,5 |
| 2-A | 0,7 | 0,3 |
| 2-B | 0,5 | 0,5 |
| 2-C | 0,9 | 0,5 |
| 2-D | 0,9 | 0,7 |
| 2-E | 0,5 | 0,5 |
| 3-A | 0,7 | 0,5 |
| 3-B | 0,7 | 0,5 |
| 3-C | 0,7 | 0,9 |
| 3-D | 0,9 | 0,7 |
| 3-E | 0,9 | 0,5 |
| 4-A | 0,9 | 0,7 |
| 4-B | 0,7 | 0,5 |
| 4-C | 0,5 | 0,3 |
| 4-D | 0,9 | 0,7 |
| 4-E | 0,3 | 0,7 |
| PROM. | 0,7 | 0,6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.7, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 20/40

Tabla 18. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 20/40

| SAN ANDRES 20/40 | | | | | |
|------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0.5 | 0.5 |
| 1-B | 0.9 | 0.3 |
| 1-C | 0.7 | 0.3 |
| 1-D | 0.9 | 0.3 |
| 1-E | 0.9 | 0.7 |
| 2-A | 0.7 | 0.5 |
| 2-B | 0.9 | 0.7 |
| 2-C | 0.9 | 0.5 |
| 2-D | 0.5 | 0.3 |
| 2-E | 0.5 | 0.3 |
| 3-A | 0.7 | 0.1 |
| 3-B | 0.7 | 0.5 |
| 3-C | 0.5 | 0.3 |
| 3-D | 0.9 | 0.5 |
| 3-E | 0.7 | 0.7 |
| 4-A | 0.9 | 0.3 |
| 4-B | 0.9 | 0.3 |
| 4-C | 0.9 | 0.9 |
| 4-D | 0.9 | 0.5 |
| 4-E | 0.7 | 0.3 |
| PROM. | 0.8 | 0.4 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.8, Redondez: 0.4. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 30/50

Tabla 19. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 30/50

| SAN ANDRES 30/50 | | | | | |
|------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0.3 | 0.9 |
| 1-B | 0.7 | 0.9 |
| 1-C | 0.5 | 0.7 |
| 1-D | 0.9 | 0.5 |
| 1-E | 0.9 | 0.3 |
| 2-A | 0.7 | 0.1 |
| 2-B | 0.5 | 0.3 |
| 2-C | 0.9 | 0.7 |
| 2-D | 0.7 | 0.5 |
| 2-E | 0.5 | 0.5 |
| 3-A | 0.9 | 0.7 |
| 3-B | 0.9 | 0.7 |
| 3-C | 0.5 | 0.5 |
| 3-D | 0.7 | 0.5 |
| 3-E | 0.7 | 0.7 |
| 4-A | 0.5 | 0.5 |
| 4-B | 0.3 | 0.7 |
| 4-C | 0.5 | 0.7 |
| 4-D | 0.7 | 0.7 |
| 4-E | 0.5 | 0.5 |
| PROM. | 0.6 | 0.6 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.6, Redondez: 0.6. Concepto: pasa a la siguiente fase.

- Esfericidad y redondez muestra Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 40/70

Tabla 20. Evaluación de esfericidad y redondez Arena Peñas Blanca Mina San Andrés 40/70

| Arena San Andres peñas blancas 40/70 | | | | | |
|--------------------------------------|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

| CELDA | ESFERICIDAD | REDONDEZ |
|--------------|-------------|------------|
| 1-A | 0.5 | 0.5 |
| 1-B | 0.9 | 0.5 |
| 1-C | 0.9 | 0.5 |
| 1-D | 0.7 | 0.3 |
| 1-E | 0.9 | 0.3 |
| 2-A | 0.5 | 0.7 |
| 2-B | 0.9 | 0.7 |
| 2-C | 0.5 | 0.3 |
| 2-D | 0.9 | 0.7 |
| 2-E | 0.7 | 0.5 |
| 3-A | 0.9 | 0.7 |
| 3-B | 0.9 | 0.3 |
| 3-C | 0.5 | 0.5 |
| 3-D | 0.7 | 0.5 |
| 3-E | 0.7 | 0.3 |
| 4-A | 0.9 | 0.3 |
| 4-B | 0.9 | 0.5 |
| 4-C | 0.9 | 0.7 |
| 4-D | 0.7 | 0.7 |
| 4-E | 0.9 | 0.7 |
| PROM. | 0.8 | 0.5 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Esfericidad: 0.8, Redondez: 0.5. Concepto: pasa a la siguiente fase.

4.4 FASE 4. PRUEBA DE APLASTE O CRUSHING

La prueba de resistencia al aplastamiento o “crushing” determina la presión a la cual el material muestra excesiva generación de finos, es decir, la cantidad máxima de material aplastado de una muestra de apuntalante a una presión determinada.

Esta prueba es usada para determinar y comparar la resistencia al aplastamiento de una muestra de material de empaquetamiento. La práctica recomendada API RP 19C ISO 13503-2:2008, establece que la muestra debe ser previamente

tamizada, descartando el material retenido en la primera malla y el pan o bandeja. Únicamente las partículas que se encuentren en el rango de tamaño específico serán sometidas a la prueba de aplastamiento. La masa m_p expresada en gramos, de material de empaquetamiento necesario para cada prueba se calcula mediante la ecuación (1).

$$m_p = 24.7 * \rho_{bulk} \quad (1)$$

Donde, ρ_{bulk} es la densidad de bulto de la muestra, expresada en g/cm^3

La presión a la cual se someterá la muestra será aplicada a una rata de 2000 psi /min. Una vez se alcance la presión de prueba esta se mantendrá por 2 min.

La cantidad de material aplastado a cada nivel de presión debe ser medido mediante técnicas de tamizado. El porcentaje m'_{pan} de finos generados en la prueba se calcula mediante la ecuación (2).

$$m'_{pan} = m_{pan} / m_s * 100 \quad (2)$$

Dónde:

m_{pan} es la masa de finos generados en la prueba, expresada en gramos.

m_s es la masa de grava usada en la prueba expresada en gramos.

La evaluación de los resultados de la prueba determina el nivel de presión donde la cantidad de muestra aplastada es excesiva y la máxima presión a la cual el material debe ser sometido en un proceso de empaquetamiento.

La norma actualmente no establece los porcentajes de finos a una presión de aplastamiento determinada por lo cual, en este caso, solo se presenta el porcentaje de finos generados.

- Prueba de aplastamiento crushing Arena las Moyas 40/70

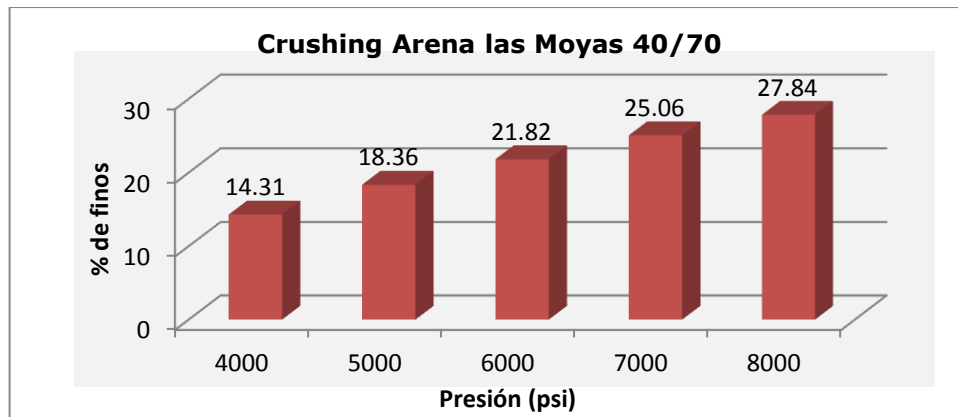
Densidad bulk 1.310 gm/cm³

Tabla 21. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para arena las Moyas 40/70.

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 30 | 0,00 | 0,62 | 0,46 | 0,31 | 0,28 | 0,28 |
| 40 | 16,18 | 16,81 | 12,18 | 10,66 | 11,77 | 7,66 |
| 50 | 36,64 | 21,11 | 19,28 | 18,45 | 17,71 | 14,62 |
| 60 | 34,51 | 25,28 | 26,85 | 28,40 | 22,62 | 25,03 |
| 70 | 12,55 | 11,93 | 13,01 | 10,11 | 9,98 | 13,94 |
| 100 | 0,00 | 9,83 | 9,58 | 10,04 | 12,30 | 10,23 |
| Base | 0,00 | 14,31 | 18,36 | 21,82 | 25,06 | 27,84 |
| Total | 99,89 | 99,88 | 99,72 | 99,78 | 99,72 | 99,60 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 34. Porcentaje de finos



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: descartada alta producción de finos

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Carreño 20/40

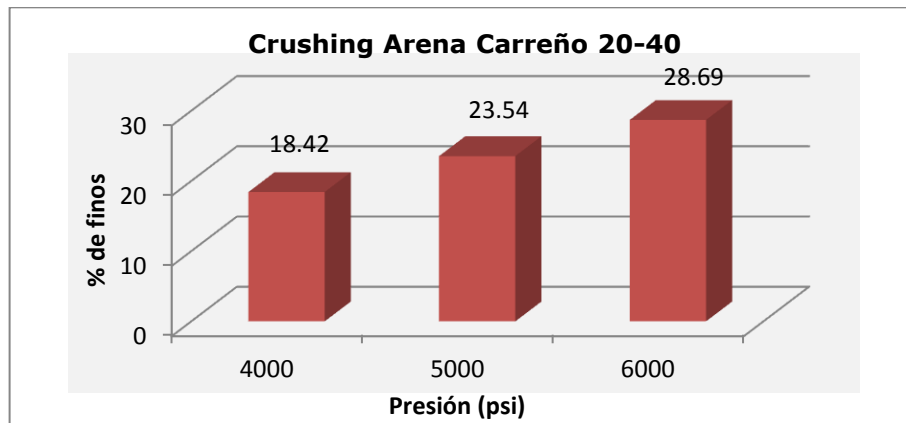
Densidad bulk 1.51 gm/cm³

Tabla 22. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Carreño 20/40

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi |
| 16 | 0,00 | 0,19 | 0,16 | 0,27 |
| 20 | 12,92 | 11,88 | 11,29 | 11,13 |
| 25 | 22,09 | 16,54 | 15,31 | 13,51 |
| 30 | 30,19 | 20,86 | 19,14 | 17,18 |
| 35 | 23,65 | 16,60 | 13,97 | 12,33 |
| 40 | 11,13 | 7,99 | 7,59 | 7,02 |
| 50 | 0,00 | 7,42 | 8,79 | 9,71 |
| Base | 0,00 | 18,42 | 23,54 | 28,69 |
| total | 99,97 | 99,70 | 99,62 | 99,28 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 35. Porcentaje de finos Arena Carreño 20/40



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: descartada alta producción de finos

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Carreño 40/70

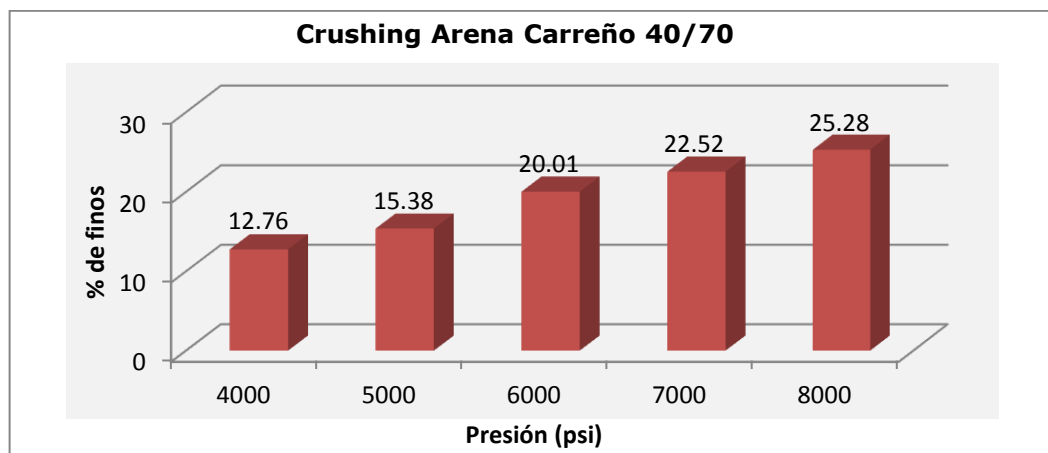
Densidad bulk 1.389 gm/cm³

Tabla 23. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Carreño 40/70

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 30 | 0,01 | 0,15 | 0,23 | 0,32 | 0,38 | 0,41 |
| 40 | 11,07 | 8,77 | 8,13 | 8,91 | 6,64 | 6,79 |
| 50 | 43,99 | 27,76 | 24,91 | 24,26 | 20,86 | 17,62 |
| 60 | 32,67 | 31,93 | 31,81 | 26,33 | 28,90 | 29,39 |
| 70 | 12,24 | 10,69 | 10,46 | 10,75 | 10,89 | 10,69 |
| 100 | 0,00 | 7,92 | 8,80 | 9,20 | 9,73 | 9,73 |
| Base | 0,00 | 12,76 | 15,38 | 20,01 | 22,52 | 25,28 |
| Total | 99,98 | 99,97 | 99,71 | 99,80 | 99,91 | 99,91 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 36. Porcentaje de finos Arena Carreño 40/70



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: descartada alta producción de finos

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Peñas Blanca 20/40

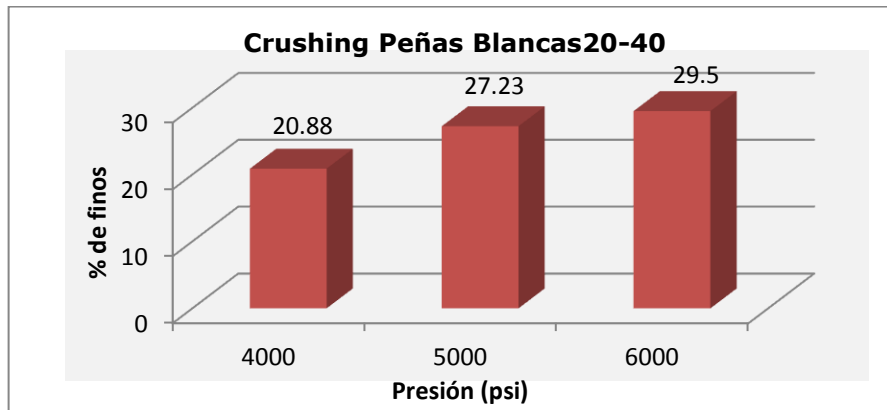
Densidad bulk 1.6 gm/cm³

Tabla 24. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Peñas Blanca 20/40

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 10,65 | 3,67 | 3,16 | 3,57 |
| 25 | 34,25 | 19,79 | 17,03 | 15,51 |
| 30 | 49,54 | 29,58 | 25,86 | 24,87 |
| 35 | 3,64 | 11,84 | 11,72 | 11,59 |
| 40 | 0,98 | 5,04 | 5,21 | 5,31 |
| 50 | 0,72 | 8,88 | 9,92 | 9,54 |
| Base | 0,00 | 20,88 | 27,23 | 29,50 |
| total | 99,78 | 99,67 | 100,13 | 99,90 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 37. Porcentaje de finos Arena Peñas Blanca 20/40



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Peñas Blanca 30/50

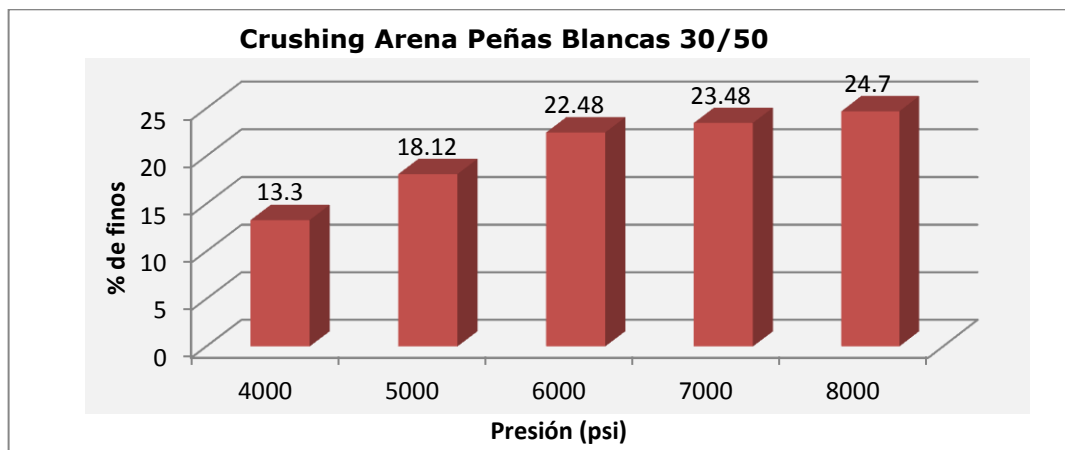
Densidad bulk 1.58 gm/cm³

Tabla 25. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Peñas Blanca 30/50

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing 30/50 | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 30 | 15,97 | 10,40 | 3,92 | 2,08 | 2,38 | 2,08 |
| 35 | 51,08 | 44,85 | 36,39 | 31,93 | 30,93 | 29,55 |
| 40 | 16,88 | 4,72 | 7,74 | 7,18 | 8,38 | 7,33 |
| 50 | 14,36 | 13,79 | 18,02 | 18,89 | 17,61 | 17,66 |
| 70 | 1,30 | 12,58 | 15,61 | 17,09 | 17,09 | 18,55 |
| Base | 0,00 | 13,30 | 18,12 | 22,48 | 23,48 | 24,73 |
| Total | 99,59 | 99,64 | 99,79 | 99,64 | 99,87 | 99,90 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 38. Porcentaje de finos Arena Peñas Blanca 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Peñas Blanca 40/70

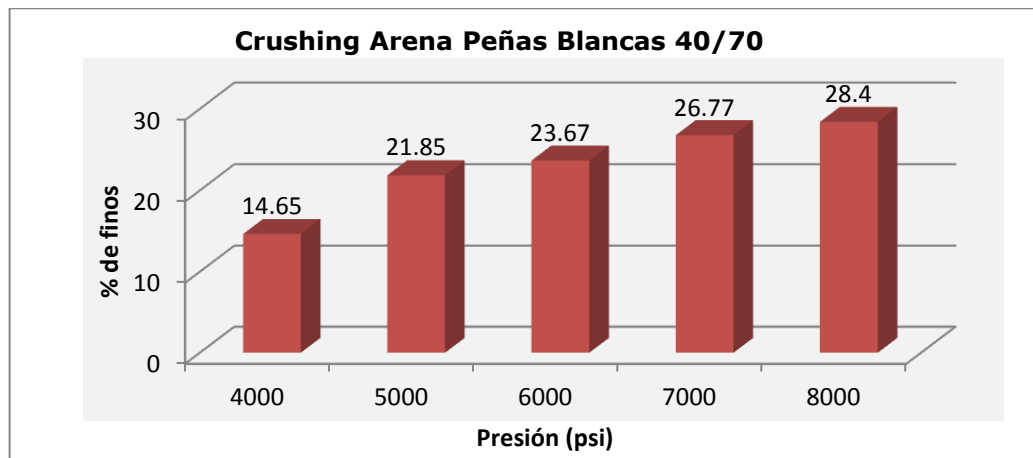
Densidad bulk 1.365 gm/cm³

Tabla 26. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Peñas Blanca 40/70

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 30 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 40 | 0,15 | 1,20 | 0,11 | 0,27 | 0,14 | 0,38 |
| 50 | 50,48 | 35,84 | 25,84 | 26,22 | 23,59 | 24,10 |
| 60 | 41,18 | 32,45 | 32,72 | 30,33 | 29,51 | 27,91 |
| 70 | 7,23 | 7,99 | 8,78 | 8,89 | 9,13 | 8,94 |
| 100 | 0,69 | 7,53 | 10,27 | 10,24 | 10,46 | 9,81 |
| Base | 0,00 | 14,65 | 21,85 | 23,67 | 26,77 | 28,40 |
| Total | 99,74 | 99,67 | 99,57 | 99,62 | 99,59 | 99,54 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 39. Porcentaje de finos Arena Peñas Blanca 40/70



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: descartada alta producción de finos

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Marcelo Arango 30/50 (arena sílicea mejor tamiz)

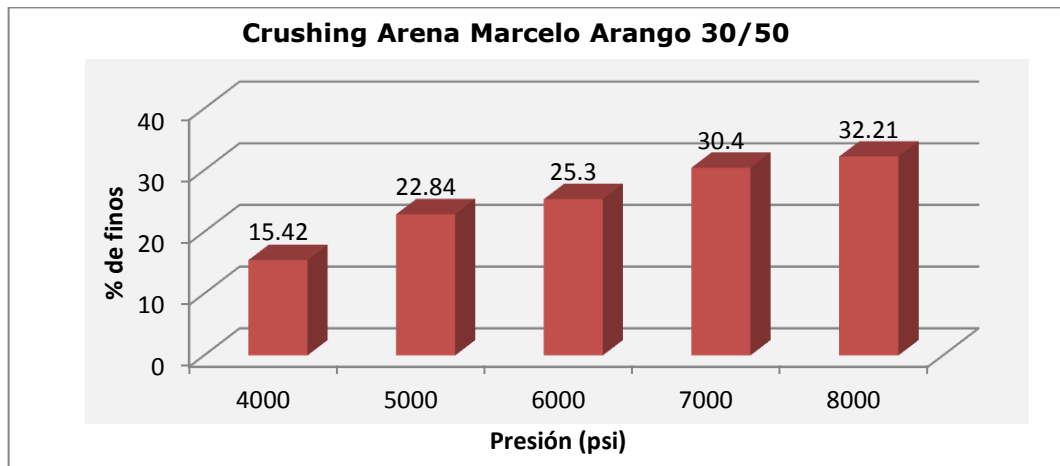
Densidad bulk 1.365 gm/cm³

Tabla 27. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Marcelo Arango 30/50

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 20 | 0,00 | 0,21 | 0,06 | 0,03 | 0,09 | 0,03 |
| 30 | 15,82 | 14,59 | 10,32 | 15,93 | 12,72 | 14,86 |
| 35 | 34,08 | 27,49 | 20,61 | 20,20 | 19,37 | 19,25 |
| 40 | 23,23 | 10,26 | 8,84 | 5,78 | 5,84 | 4,89 |
| 50 | 25,08 | 17,59 | 18,42 | 15,72 | 14,47 | 14,62 |
| 70 | 1,78 | 14,26 | 18,42 | 16,84 | 16,81 | 13,94 |
| Base | 0,00 | 15,42 | 22,84 | 25,30 | 30,40 | 32,21 |
| Total | 99,98 | 99,82 | 99,50 | 99,79 | 99,70 | 99,79 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 40. Porcentaje de finos Arena Marcelo Arango 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Marcelo Arango 40/70

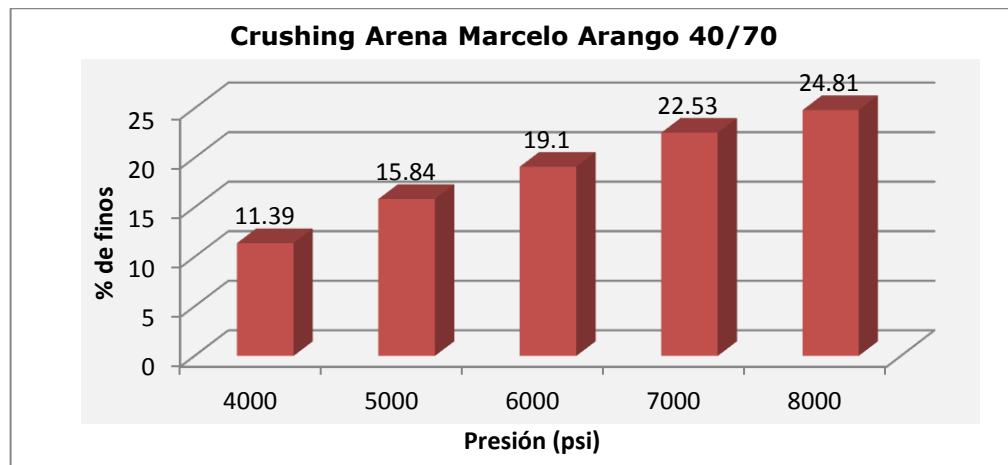
Densidad bulk 1.489 gm/cm³

Tabla 28. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Marcelo Arango 40/70

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 30 | 0,00 | 0,22 | 0,24 | 0,22 | 0,16 | 0,22 |
| 40 | 13,87 | 8,21 | 12,72 | 9,51 | 7,66 | 7,31 |
| 50 | 36,15 | 38,67 | 34,59 | 31,55 | 29,48 | 27,34 |
| 60 | 29,67 | 27,58 | 21,74 | 23,86 | 23,21 | 22,42 |
| 70 | 20,27 | 6,55 | 6,66 | 7,12 | 7,58 | 7,91 |
| 100 | 0,00 | 6,98 | 8,13 | 8,48 | 9,21 | 9,70 |
| Base | 0,00 | 11,39 | 15,84 | 19,10 | 22,53 | 24,81 |
| Total | 99,96 | 99,59 | 99,92 | 99,84 | 99,84 | 99,70 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 41. Porcentaje de finos Arena Marcelo Arango 40/70



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: descartada alta producción de finos

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Doradas 20/40

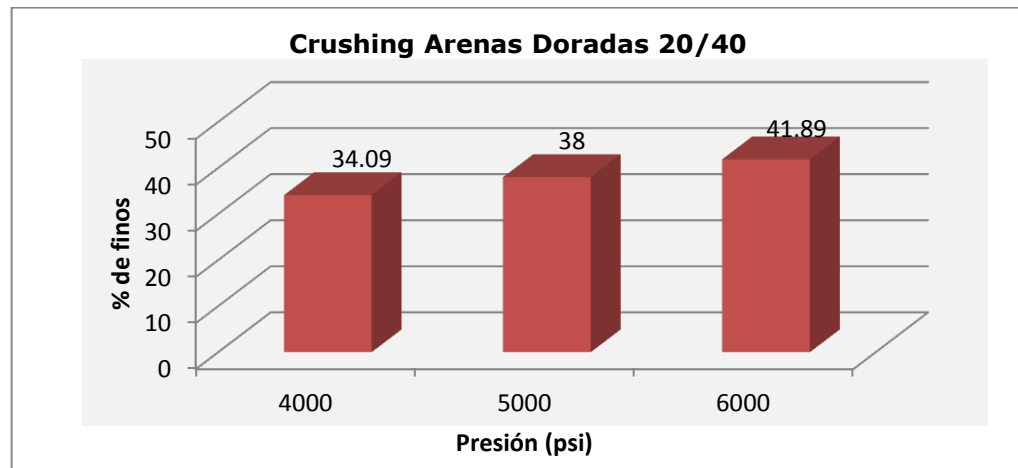
Densidad bulk 1.5 gm/cm³

Tabla 29. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Doradas 20/40

| Tamizado | | Tamizado después de crushing | | |
|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,05 |
| 25 | 12,68 | 1,11 | 1,00 | 1,03 |
| 30 | 36,33 | 14,60 | 12,39 | 12,23 |
| 35 | 28,46 | 24,59 | 22,43 | 20,84 |
| 40 | 20,68 | 10,04 | 10,34 | 8,88 |
| 50 | 1,68 | 15,11 | 15,47 | 14,76 |
| Base | 0,00 | 34,09 | 38,00 | 41,89 |
| total | 99,84 | 99,57 | 99,65 | 99,68 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 42. Porcentaje de finos Arena Doradas 20/40



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Doradas 30/50 (arena silicea)

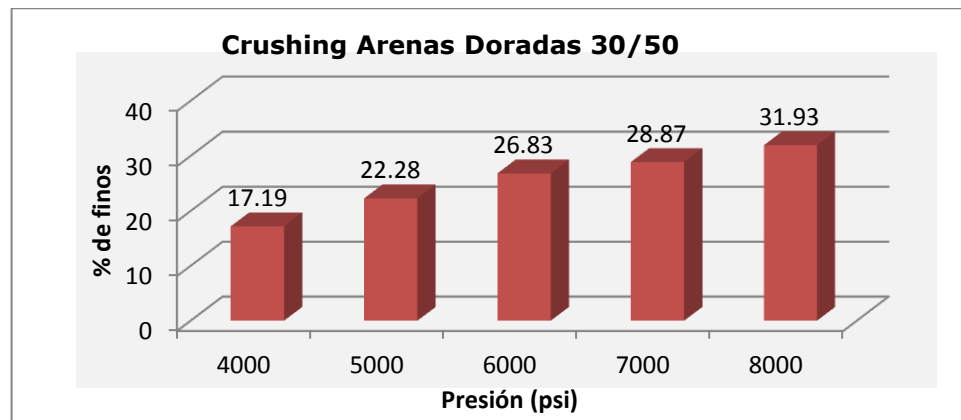
Densidad bulk 1.389 gm/cm³

Tabla 30. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Doradas 30/50

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 20 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 30 | 38,99 | 26,45 | 23,10 | 17,16 | 16,75 | 15,61 |
| 35 | 26,27 | 19,40 | 17,27 | 16,98 | 17,13 | 15,12 |
| 40 | 12,94 | 5,97 | 5,10 | 5,51 | 5,56 | 5,42 |
| 50 | 15,57 | 16,11 | 16,05 | 15,96 | 14,39 | 14,30 |
| 70 | 6,00 | 14,39 | 15,73 | 17,16 | 16,92 | 17,10 |
| Base | 0,12 | 17,19 | 22,28 | 26,83 | 28,87 | 31,93 |
| Total | 99,95 | 99,50 | 99,53 | 99,59 | 99,62 | 99,48 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 43. Porcentaje de finos Arena Doradas 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: pasa a la siguiente fase

- Prueba de aplastamiento crushing Arena Doradas 40/70

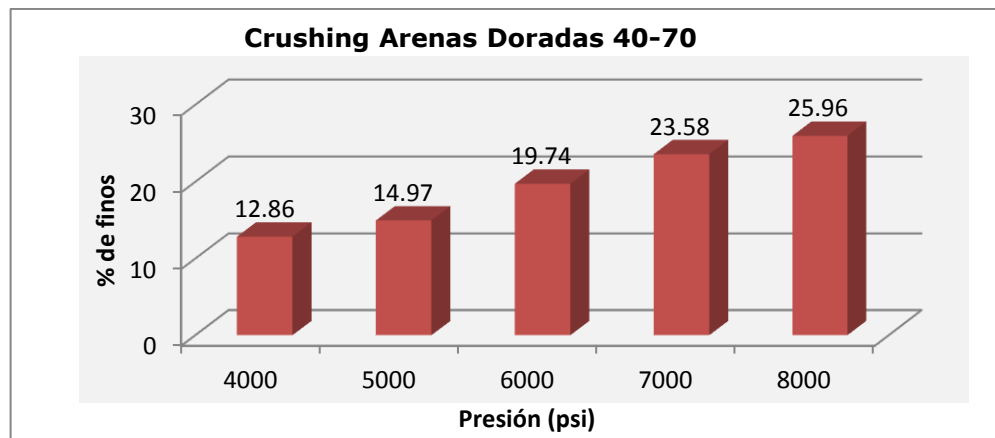
Densidad bulk 1.359 gm/cm³

Tabla 31. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para Arena Doradas 40/70

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 30 | 0,66 | 0,95 | 0,71 | 0,42 | 0,24 | 0,27 |
| 40 | 38,32 | 27,90 | 30,87 | 20,51 | 19,95 | 18,40 |
| 50 | 28,03 | 27,60 | 24,77 | 24,92 | 22,18 | 21,32 |
| 60 | 31,42 | 17,62 | 15,51 | 18,67 | 18,46 | 17,80 |
| 70 | 1,44 | 5,89 | 5,75 | 7,09 | 6,52 | 6,79 |
| 100 | 0,09 | 6,76 | 7,17 | 8,31 | 8,69 | 9,08 |
| Base | 0,04 | 12,86 | 14,97 | 19,74 | 23,58 | 25,96 |
| Total | 100 | 99,58 | 99,76 | 99,64 | 99,61 | 99,61 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 44. Porcentaje de finos Arena Doradas 40/70



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Concepto: descartada alta producción de finos

- Prueba de aplastamiento crushing Mina Benicio 30/50

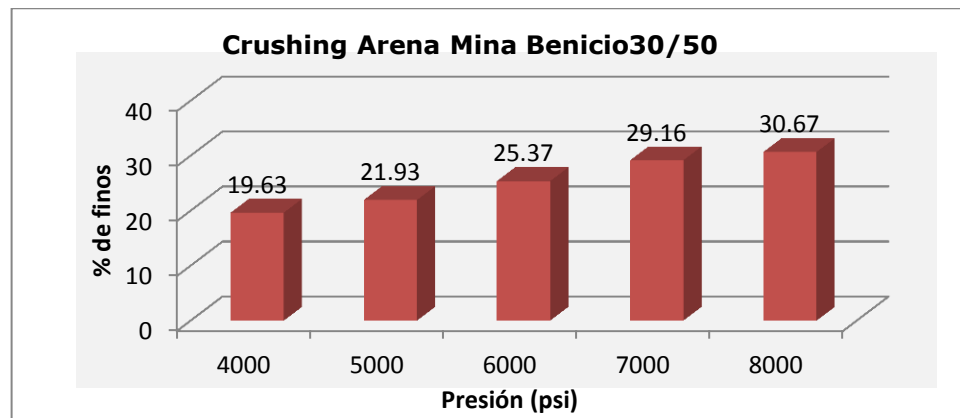
Densidad bulk 1.389 gm/cm³

Tabla 32. Ensayo de Aplastamiento o Crushing para mina Benicio 30/50

| Tamizado antes de crushing | | Tamizado después de crushing | | | | |
|----------------------------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| No Tamiz | Tamizado | 4000 psi | 5000 psi | 6000 psi | 7000 psi | 8000 psi |
| 20 | 0,00 | 0,09 | 0,03 | 0,09 | 0,09 | 0,15 |
| 30 | 13,78 | 10,02 | 9,18 | 9,38 | 6,09 | 7,89 |
| 35 | 36,49 | 18,73 | 14,54 | 16,49 | 13,57 | 16,14 |
| 40 | 24,58 | 7,22 | 7,49 | 5,83 | 5,59 | 5,71 |
| 50 | 25,08 | 26,39 | 27,82 | 23,07 | 23,91 | 20,71 |
| 70 | 0,19 | 17,48 | 18,61 | 19,28 | 21,09 | 18,61 |
| Base | 0,00 | 19,63 | 21,93 | 25,37 | 29,16 | 30,67 |
| Total | 100,13 | 99,56 | 99,59 | 99,50 | 99,50 | 99,88 |

Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

Figura 45. Porcentaje de finos mina Benicio 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

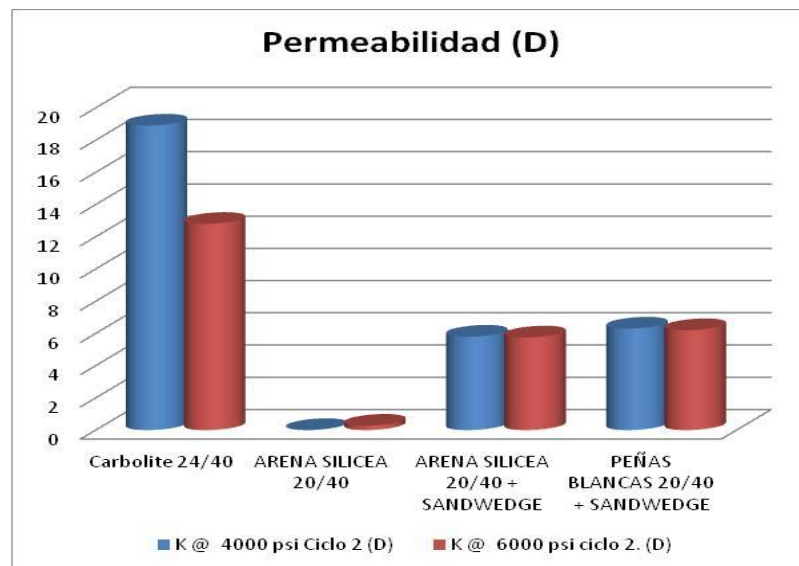
Concepto: descartada alta producción de finos

4.5 FASE 5. PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD

Esta prueba consiste en medir la permeabilidad de cada muestra de arena en condiciones de presión y flujo de fluidos simulados, para esta fase se tuvieron en cuenta 4 muestras, además a las muestras se le agrego un aditivo resinado que ayuda que las partículas no se descompongan con la presión este aditivo se llama Sanwedge, estos resultados se compararan con la permeabilidad de muestras de propantes importados Texas Silica para la malla 30/50 y Carbolite para la malla 20/40.

- Malla 20/40

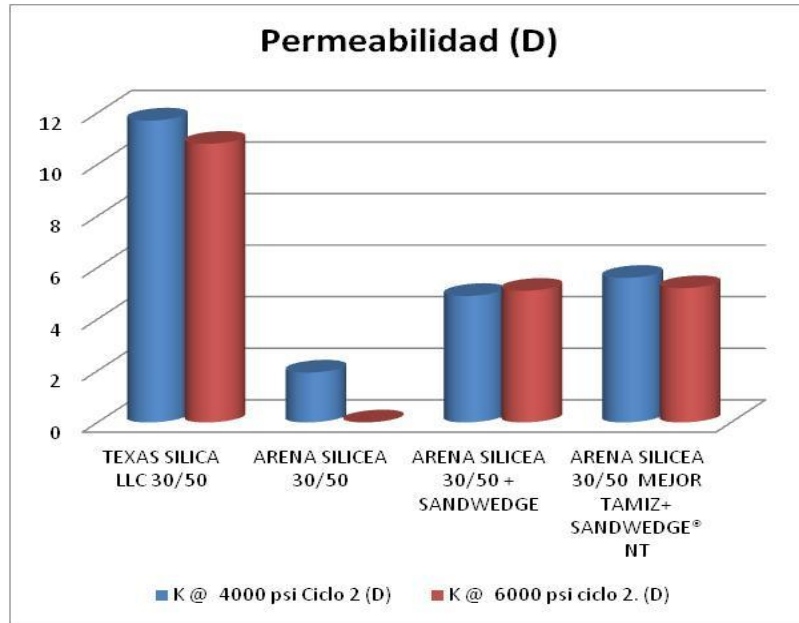
Figura 46. Comparativo de permeabilidad malla 20/40



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

- Malla 30/50

Figura 47. Comparativo de permeabilidad malla 30/50



Fuente: Ecopetrol informe resultados de evolución de arenas locales

5. PRINCIPIOS BASICOS DE DISEÑO Y ANALISIS DE EXPERIMENTOS.

Si quiere llevarse a cabo un experimento con la mayor eficiencia posible, es necesario utilizar un enfoque científico para planearlo. El diseño estadístico de experimentos se refiere al proceso para planear el experimento de tal forma que se recaben datos adecuados que puedan analizarse con métodos estadísticos que llevaran a conclusiones válidas y objetivas.

Los tres principios básicos del diseño experimental son la realización de réplicas, la aleatorización y la formación de bloques. Por realización de réplicas se entiende la repetición del experimento básico. La aleatorización es la piedra angular en la que se fundamenta el uso del método estadístico en el diseño experimental, por aleatorización se entiende que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizaran las corridas o ensayos individuales del experimento se determinan al azar. Mientras que la formación de bloques es una técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés, muchas veces la formación de bloques se emplea para reducir o eliminar la variabilidad transmitida por factores perturbadores; es decir aquellos factores que pueden influir en la respuesta experimental pero en los que no hay un interés específico.¹⁵

- Elección de los factores, los niveles, los rangos.
- Selección de la variable de respuesta.
- Elección del diseño experimental.
- Realización del experimento.
- Análisis estadístico de los datos.
- Conclusiones y recomendaciones.¹⁶

¹⁵ MONTGOMERY, Douglas C (1995). Diseño y análisis de experimentos.

¹⁶ Ibid.

5.1 IDENTIFICACIÓN Y ENUNCIACIÓN DEL PROBLEMA.

El experimento consiste en la evolución del material propante base arena natural proveniente de canteras en Colombia, sometiendo el material a diferentes pruebas que permitan dar una idea clara sobre la calidad y la conveniencia o no de la aplicación en la industria.

El desarrollo de este estudio tiene como finalidad sugerir una metodología para la evaluación futura de materiales propantes base arena natural que permita tener un alto grado de certeza en los datos obtenidos, identificando las diferentes variables que afecta la calidad del material.

Durante el desarrollo de esta evaluación, se realizaran pruebas de tamizado, granulometría, con el fin d determinar las mejores muestras para realizar pruebas en las cuales se simule condiciones de yacimiento como aplaste y conductividad.

5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL TAMIZADO

En la selección de factores se debe considerar cuales afectan la respuesta y no hacer esfuerzos en estudiar parámetros que sepamos a priori no son importantes.¹⁷

5.2.1 Elección del diseño experimental. Para el diseño experimental de la prueba se escogido fue el de experimentos con solo factor pues solo se va a tener en cuenta el diámetro de la partícula de arena y para esto se escogieron 18 niveles que vendrían siendo el número de muestras a analizar el los tamices y se

¹⁷ CORREA NIÑO, Nathalie Melina y OROZCO CERA Eusebio José. Evaluación de los componentes efectivos del mucílago del fique para la inhibición de arcillas. Bucaramanga, 2010, trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos) Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

decide escoger 3 réplicas por cada nivel por lo tanto serian 54 corridas que deberán llevarse a cabo de forma aleatoria.

Esta secuencia de pruebas aleatorizadas es necesaria para evitar que los efectos perturbadoras de variables desconocidas, las cuales varían fuera de control durante el experimento y contaminen los resultados.¹⁸ Esto se lleva a cabo de la siguiente forma primero se ordena los niveles con su respectivo número de pruebas como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 33. Número de pruebas por nivel

| Muestra | Numero de Corridas | | |
|----------------|---------------------------|----|----|
| 1 | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 4 | 5 | 6 |
| 3 | 7 | 8 | 9 |
| 4 | 10 | 11 | 12 |
| 5 | 13 | 14 | 15 |
| 6 | 16 | 17 | 18 |
| 7 | 19 | 20 | 21 |
| 8 | 22 | 23 | 24 |
| 9 | 25 | 26 | 27 |
| 10 | 28 | 29 | 30 |
| 11 | 31 | 32 | 33 |
| 12 | 34 | 35 | 36 |
| 13 | 37 | 38 | 39 |
| 14 | 40 | 41 | 42 |
| 15 | 43 | 44 | 45 |
| 16 | 46 | 47 | 48 |
| 17 | 49 | 50 | 51 |
| 18 | 52 | 53 | 54 |

Fuente: autor

Posterior a esto se selecciona un número aleatorios entre 1 y 54, se observa que numero de muestra corresponde a esta corrida como se muestra en la siguiente tabla:

¹⁸ MONTGOMERY. Op. Cit.

Tabla 34. Secuencia aleatoria de pruebas

| Secuencia aleatoria de prueba | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| Secuencia | Corrida | Muestra | Secuencia | Corrida | muestra | corridas | Corrida | muestra |
| 1 | 52 | 18 | 19 | 35 | 12 | 37 | 15 | 5 |
| 2 | 40 | 14 | 20 | 29 | 10 | 38 | 37 | 13 |
| 3 | 41 | 14 | 21 | 48 | 16 | 39 | 3 | 1 |
| 4 | 13 | 5 | 22 | 17 | 6 | 40 | 46 | 16 |
| 5 | 39 | 13 | 23 | 10 | 4 | 41 | 32 | 11 |
| 6 | 47 | 16 | 24 | 44 | 15 | 42 | 25 | 9 |
| 7 | 28 | 10 | 25 | 38 | 13 | 43 | 5 | 2 |
| 8 | 26 | 9 | 26 | 14 | 5 | 44 | 16 | 6 |
| 9 | 7 | 3 | 27 | 27 | 9 | 45 | 11 | 4 |
| 10 | 4 | 2 | 28 | 6 | 2 | 46 | 24 | 8 |
| 11 | 21 | 7 | 29 | 36 | 12 | 47 | 30 | 10 |
| 12 | 49 | 17 | 30 | 19 | 7 | 48 | 53 | 18 |
| 13 | 12 | 4 | 31 | 50 | 17 | 49 | 22 | 8 |
| 14 | 33 | 11 | 32 | 34 | 12 | 50 | 54 | 18 |
| 15 | 23 | 8 | 33 | 2 | 1 | 51 | 20 | 7 |
| 16 | 42 | 14 | 34 | 51 | 17 | 52 | 18 | 6 |
| 17 | 1 | 1 | 35 | 31 | 11 | 53 | 45 | 15 |
| 18 | 8 | 3 | 36 | 43 | 15 | 54 | 9 | 3 |

Fuente: autor

Luego de corrida las pruebas es necesario hacer un análisis de varianza el cual debe hacerse promediando la cantidad en gramos observada por plato y estableciendo y posteriormente estableciendo que porcentaje de la muestra pertenece a cada tamaño de grano

5.3 DISEÑO EXPERIMENTAL ESFERICIDAD Y REDONDEZ

En la selección de factores se debe considerar cuales afectan la respuesta en este caso será un valor que indique el grado de redondez y esfericidad de cada partícula.

5.3.1 Elección del diseño experimental. Para el diseño experimental de la prueba también se escogido es el de experimentos con solo factor pues solo se va a tener en cuenta un valor representativo de la redondez y esfericidad entre 1 y 10 de la partícula de arena y para esto se escogieron 17 niveles que vendrían siendo el número de muestras a analizar en este experimento por la norma ISO se debe replicar 20 por cada nivel por lo tanto serian 340 corridas u observaciones que deberán llevarse a cabo de forma aleatoria.

Esta secuencia de pruebas aleatorizadas es necesaria para evitar que los efectos perturbadoras de variables desconocidas, las cuales varían fuera de control durante el experimento y contaminen los resultados.¹⁹ Esto se lleva a cabo de forma análoga al diseño experimental anterior:

Tabla 35. Número de pruebas por nivel

| Muestra | Numero de Corridas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|---------------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 2 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 3 | 41 | 42 | 9 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| 4 | 61 | 62 | 12 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| 5 | 81 | 82 | 15 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 |
| 6 | 101 | 102 | 18 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 7 | 121 | 122 | 21 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 |
| 8 | 141 | 142 | 24 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 |
| 9 | 161 | 162 | 27 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 |
| 10 | 181 | 182 | 30 | 184 | 185 | 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 |
| 11 | 201 | 202 | 33 | 204 | 205 | 206 | 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 |
| 12 | 221 | 222 | 36 | 224 | 225 | 226 | 227 | 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 |
| 13 | 241 | 242 | 39 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 | 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 |
| 14 | 261 | 262 | 42 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 | 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 |
| 15 | 281 | 282 | 45 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 | 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 |
| 16 | 301 | 302 | 48 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 | 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 |
| 17 | 321 | 322 | 51 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 | 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 |

Fuente: autor

¹⁹ Ibid.

Para mayor practicidad se debe ordenar aleatoriamente la secuencia de pruebas no por las corridas u observaciones si no por muestra para no extender el experimento, como se muestra en la tabla:

Tabla 36. Secuencia aleatoria de pruebas

| Secuencia aleatoria de prueba | | | |
|-------------------------------|---------|-----------|---------|
| Secuencia | Muestra | Secuencia | Muestra |
| 1 | 17 | 10 | 9 |
| 2 | 10 | 11 | 1 |
| 3 | 16 | 12 | 8 |
| 4 | 11 | 13 | 2 |
| 5 | 15 | 14 | 7 |
| 6 | 14 | 15 | 3 |
| 7 | 4 | 16 | 13 |
| 8 | 12 | 17 | 6 |
| 9 | 5 | | |

Fuente: autor

Luego de corrida u observaciones las pruebas es necesario hacer un análisis de varianza el cual debe se hace promediando los 20 valores observados de esfericidad y redondez para obtener un valor representativo por muestra de esta propiedad.

5.4 DISEÑO EXPERIMENTAL APLASTE O CRUSHING

En la selección de factores se debe considerar cuales afectan la respuesta en este caso será un valor de resistencia al aplasté de cada muestra cada partícula.

5.4.1 Elección del diseño experimental. Para el diseño experimental de la prueba también se escogido es el de experimentos con solo factor pues solo se va a tener en cuenta un valor representativo porcentual de generación de finos y para esto se tuvieron en cuenta 12 niveles que vendrían siendo el número de muestras a analizar en este experimento por otra parte se debe replicar 5 por cada nivel por

lo tanto serian 60 corridas u observaciones que deberán llevarse a cabo de forma aleatoria.

Esta secuencia de pruebas aleatorizadas es necesaria para evitar que los efectos perturbadoras de variables desconocidas, las cuales varían fuera de control durante el experimento y contaminen los resultados.²⁰ Esto se lleva a cabo de forma análoga al diseño experimental anterior:

Tabla 37. Número de pruebas por nivel

| Muestra | Numero de Corridas | | | | |
|----------------|---------------------------|----|----|----|----|
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 4 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 5 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 6 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 7 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| 8 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 9 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
| 10 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 |
| 11 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 |
| 12 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |

Fuente: autor

²⁰ Ibid.

Tabla 38. Secuencia aleatoria de pruebas

| Secuencia aleatoria de prueba | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Secuencia | Corrida | Muestra | Secuencia | Corrida | muestra | secuencia | Corrida | muestra |
| 1 | 32 | 7 | 21 | 7 | 2 | 41 | 52 | 11 |
| 2 | 34 | 7 | 22 | 4 | 1 | 42 | 5 | 1 |
| 3 | 42 | 9 | 23 | 28 | 6 | 43 | 55 | 11 |
| 4 | 33 | 7 | 24 | 20 | 4 | 44 | 58 | 12 |
| 5 | 29 | 6 | 25 | 19 | 4 | 45 | 59 | 12 |
| 6 | 18 | 4 | 26 | 36 | 8 | 46 | 26 | 6 |
| 7 | 30 | 6 | 27 | 1 | 1 | 47 | 10 | 2 |
| 8 | 23 | 5 | 28 | 35 | 7 | 48 | 21 | 5 |
| 9 | 39 | 8 | 29 | 44 | 9 | 49 | 8 | 2 |
| 10 | 43 | 9 | 30 | 45 | 9 | 50 | 9 | 2 |
| 11 | 38 | 8 | 31 | 46 | 10 | 51 | 15 | 3 |
| 12 | 51 | 11 | 32 | 48 | 10 | 52 | 22 | 5 |
| 13 | 40 | 8 | 33 | 53 | 11 | 53 | 11 | 3 |
| 14 | 16 | 4 | 34 | 54 | 11 | 54 | 37 | 8 |
| 15 | 41 | 9 | 35 | 6 | 2 | 55 | 14 | 3 |
| 16 | 3 | 1 | 36 | 49 | 10 | 56 | 60 | 12 |
| 17 | 27 | 6 | 37 | 31 | 7 | 57 | 12 | 3 |
| 18 | 47 | 10 | 38 | 57 | 12 | 58 | 39 | 8 |
| 19 | 25 | 5 | 39 | 50 | 10 | 59 | 24 | 5 |
| 20 | 56 | 12 | 40 | 17 | 4 | 60 | 13 | 3 |

Fuente: autor

Luego de corrida u observaciones las pruebas es necesario hacer un análisis de varianza el cual se hace a través de un análisis de tamizado con el fin de establecer cuanta cantidad y que porcentaje de finos se generó.

Como es necesario un posterior análisis de tamizado hay que cuantificar estos experimentos, por lo seria 12 muestras y 12 análisis de tamizado no es posible realizar las 3 repeticiones como se planteó anteriormente pues la cantidad de material no es suficiente.

5.5 DISEÑO EXPERIMENTAL PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD

En la selección de factores se debe considerar cuales afectan la respuesta en este caso específico la variable que va a afectar la respuesta será la presión pues aunque existen otras variables (cantidad de aditivo, tamaño, flujo, cantidad de muestra) es necesario mantenerlas constantes para garantizar la comparación entre ellas o con otras muestras, y solo nos interesa el efecto de la presión.

5.5.1 Elección del diseño experimental. Para el diseño experimental de la prueba se escogido fue el de experimentos con un solo factor pues solo se va a tener en cuenta el efecto de la presión sobre la muestra; este experimento consta de 4 niveles que vendrían siendo el número de muestras a analizar y es necesario escoger 3 réplicas por cada nivel por lo tanto serian 12 corridas que deberán llevarse a cabo de forma aleatoria.

Esta secuencia de pruebas aleatorizadas es necesaria para evitar que los efectos perturbadoras de variables desconocidas, las cuales varían fuera de control durante el experimento y contaminen los resultados.²¹ Esto se lleva a cabo de la siguiente forma primero se ordena los niveles con su respectivo número de pruebas como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 39. Número de pruebas por nivel

| Muestra | Numero de Corridas | | |
|----------------|---------------------------|----|----|
| 1 | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 4 | 5 | 6 |
| 3 | 7 | 8 | 9 |
| 4 | 10 | 11 | 12 |

Fuente: autor

²¹ Ibid.

Posterior a esto se hace necesario hacer las pruebas de una forma aleatoria como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 40. Secuencia aleatoria de pruebas

| Secuencia aleatoria de prueba | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Secuencia | Corrida | Muestra | Secuencia | Corrida | muestra |
| 1 | 5 | 2 | 7 | 10 | 4 |
| 2 | 7 | 3 | 8 | 6 | 2 |
| 3 | 2 | 1 | 9 | 3 | 1 |
| 4 | 9 | 3 | 10 | 8 | 3 |
| 5 | 4 | 2 | 11 | 12 | 4 |
| 6 | 1 | 1 | 12 | 11 | 4 |

Fuente: autor

Luego de corrida las pruebas es necesario hacer un análisis de varianza el cual debe hacerse por medio de observaciones de los valores de permeabilidad y promediando los valores que corresponden a cada nivel para obtener un valor representativo de cada muestra.

6. ESTUDIO DE PROYECTOS DE INVERSIÓN

6.1 ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVERSIÓN

6.1.1 Identificación. Gran parte del éxito del proyecto depende de la claridad con que se identifique la necesidad, o la oportunidad, o la obligación para asignar recursos útiles, valiosos, escasos, producto del trabajo del hombre y utilizables en múltiples y variadas opciones y que tienen además capacidad multiplicativa en procesos productivos. Esta identificación puede hacerse a nivel microeconómico, en términos de las oportunidades de demanda efectiva que ofrece el mercado en un tiempo determinado para un producto o un servicio. Son oportunidades que encuentra el inversionista usualmente del sector privado para crear y producir, transformar, extraer y/o comercializar bienes y servicios, de acuerdo con lo que busca el cliente del país o del exterior según sus necesidades naturales o condicionadas.

6.1.2 Estudio de alternativas. Una vez precisada la necesidad, oportunidad u obligación como parte del proceso general del proyecto, se inicia el estudio de las alternativas de satisfacción o de respuesta, en términos de un bien o servicio determinados. Este estudio se da en varias etapas según la importancia, complejidad y valor de la necesidad y de los recursos que sean del caso comprometer:

- EXPLORACION PREVIA, o estudio preliminar que busca reunir información para anticipar globalmente cuál podría ser la viabilidad de la inversión. Se identifican aquí cuáles son las alternativas de solución posibles para seleccionar entre ellas las de mayores ventajas.

- PREFACTIBILIDAD, o estudio de mayor profundidad de las alternativas seleccionadas en la etapa anterior. Se trata de buscar mayor confiabilidad en la información especialmente de orden técnico, económico y financiero. Se selecciona la mejor alternativa y una segunda que sirva de referencia.
- FACTIBILIDAD, o estudio exhaustivo de la mejor alternativa seleccionada en la etapa de prefactibilidad, comparada con la segunda mejor. Se estudia en detalle cada componente del proyecto, especificando y precisando la información técnica, tecnológica, de ingeniería, tamaño, localización, económica, financiera, de mercado, organizacional, legal, laboral, fiscal, infraestructura, de impacto social y ambiental, buscando los mayores niveles de confiabilidad en cada decisión tomada en el proceso de estudio. Se formula la así el proyecto específico con base en las más ventajosas alternativas técnicas y económicas, según pruebas reales y objetivas de calidad, rendimiento, reservas, disponibilidad y costos de los recursos, equipos e insumos, funcionalidad de los sistemas diseñados y viabilidad real de la inversión en conjunto, para interpretar así su verdadera capacidad, perspectivas y limitaciones.

6.1.3 Toma de decisiones. La decisión con base en los resultados del estudio es simplemente decir SI o NO a la asignación de los recursos que exige el proyecto investigado y a la actividad que de ahí se deriva para producir un bien o servicio que satisfaga una necesidad determinada, o permita aprovechar una oportunidad, o cumplir alguna obligación. Téngase en cuenta que una vez tomada la decisión no se puede echar atrás sin incurrir en sobre costos, pérdidas o demoras. Las decisiones no se corrigen, simplemente se toman otras decisiones. De ahí que se recomiende no olvidar que "LA MEJOR DECISION ES AQUELLA QUE SE TOMA UNA SOLA VEZ" para llegar a un objetivo propuesto.

6.1.4 Inversión. La Inversión es el objeto específico del Proyecto. Está constituida por cinco componentes interrelacionados e interdependientes entre sí, todos igualmente importantes y significativos. Es por esta razón que la evaluación del proyecto no puede reducirse únicamente a sus aspectos financieros, sin antes haber evaluado los demás componentes de su estructura, que en resumen son:

Figura 48. Aspectos principales del proyecto de inversión



Fuente: Daza Martínez Libardo (1991). Estudio de proyectos de inversión.

En la práctica, mientras en la etapa del estudio se enfatizan los aspectos económicos y financieros, durante la etapa de ejecución de la inversión el énfasis está en la parte técnica, de ingeniería, tecnología y calidad, aspectos estos que deben ser tenidos en cuenta para efectos de la administración tanto del estudio como de la ejecución del proyecto.

6.1.5 Vida útil. La etapa de vida útil o de aprovechamiento del proyecto, determina el horizonte de evaluación del mismo. Esta vida útil comienza cuando se comprueba que el producto, bien o servicio objeto del proyecto, ha sido aceptado por el mercado y genera su propia demanda efectiva, suficiente para generar el nivel de ingresos que requiere el sostenimiento y desarrollo de la empresa constituida.²²

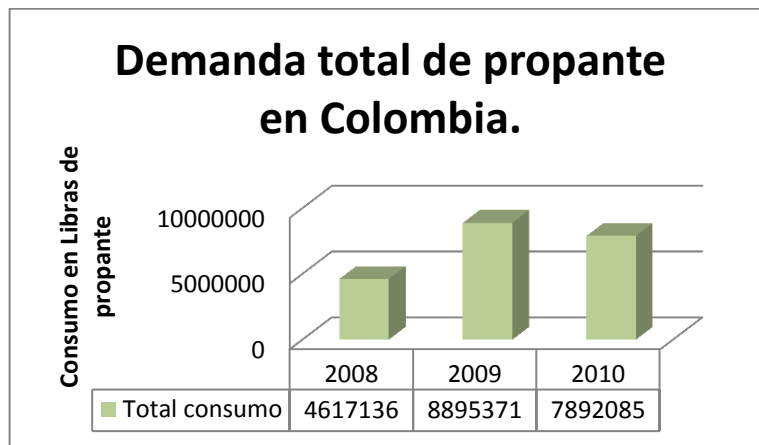
²² DAZA MARTÍNEZ, Libardo (1991). Estudio de proyectos de inversión.

6.2 MATERIAL PROPANTE EN COLOMBIA.

6.2.1 Comportamiento de la Demanda de propantes en Colombia durante los últimos tres años. En Colombia, los campos convencionales no han masificado las operaciones de fracturamiento hidráulico, por ende la demanda del producto es baja, comparado a E.E. U.U., Argentina u otros.

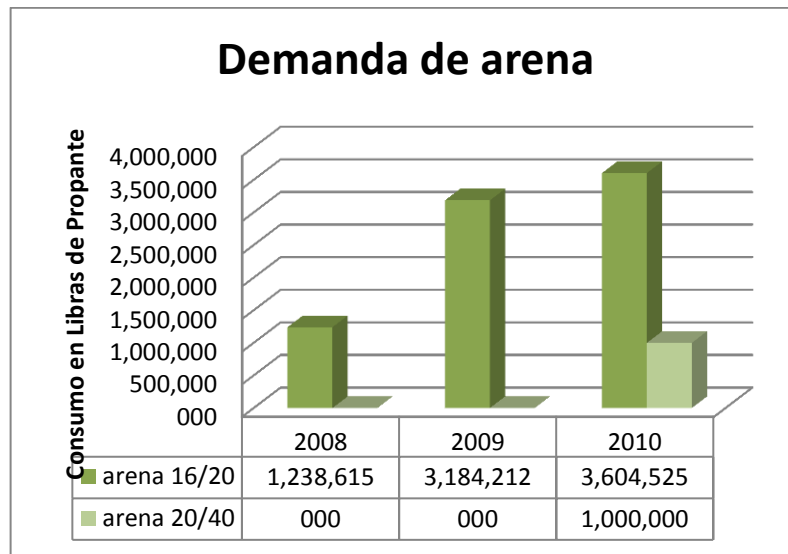
A continuación se presenta la demanda de propante durante los años 2008, 2009 y 2010.

Figura 49. Demanda Total de Propante en Colombia



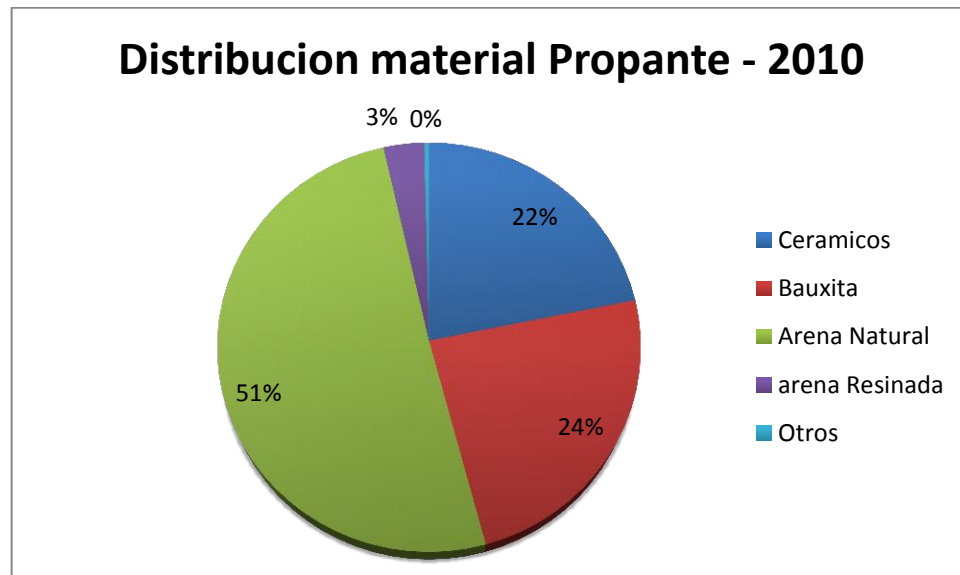
Fuente: Propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas

Figura 50. Demanda de material propante arena natural.



Fuente: Ecopetrol propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas

Figura 51. Distribución por material propante



Fuente: Ecopetrol propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas

El propante de mayor consumo en el país, durante el 2010, fue en su orden:

- Arena natural 16/30 y 12/20, con 3.484.525 Libras
- Bauxita 16/20, 14/30 y 20/40, con 1.652.173 Libras
- LWC 16/20 y 20/40 con 1.501.562 Libras
- RCS 20/40 con 220.000 Libras
- Otros con 25.825 Libras

La aplicación de arenas naturales está asociada, a pozos entre 2000-6000 ft con esfuerzo neto sobre el propante menor a 4000 psi., entre el Huila y Tolima principalmente.

El consumo de Bauxita está asociado principalmente a las operaciones del Casanare y Meta, con profundidad TVD mayor a 10000 ft y esfuerzo neto sobre el propante superior a 8000 psi.

El uso de propantes de tamaño pequeño 30/50 y 40/60 se ha limitado principalmente a operaciones de Gravel Pack durante 2008 y 2009 con un porcentaje inferior al 1% sobre la masa total de propante consumido en el país, para este periodo de tiempo.

Durante el 2010 no se reporta ningún consumo de propantes de tamaño pequeño 30/50 y 40/70. La proyección de su demanda para el 2011 y 2012 está limitada al Proyecto de Shale Plays, los excedentes de este proyecto no tendrían valor residual en el País.

6.3 ANÁLISIS FINANCIERO

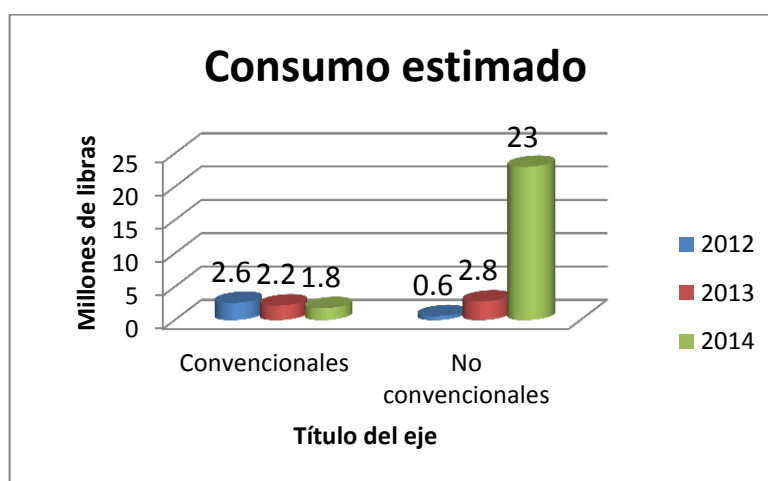
Para el análisis financiero de este proyecto se partió desde la demanda esperada de material propante en Colombia tantos para yacimientos convencionales como no convencionales (Shales Gas), para los próximos años esta predicción está basada en la explotación futura de yacimientos no convencionales de shales gas en el valle medio del magdalena. En este orden de idea se espera que la demanda se comporte de la siguiente manera:

Tabla 41. Comportamiento de la demanda de material propante

| Consumo estimado de propante, base arena natural, en Colombia (años 2012-2014) | | | |
|---|--------------------|-------------------|-------|
| Año | Convencionales | No convencionales | Total |
| | Millones de libras | | |
| 2012 | 2,6 | 0,6 | 3,2 |
| 2013 | 2,2 | 2,8 | 5 |
| 2014 | 1,8 | 23 | 24,8 |

Fuente: Ecopetrol propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas

Figura 52. Comportamiento de la demanda de material propante



Fuente: Ecopetrol propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas

De acuerdo a lo anterior se puede inferir que en el abastecimiento de material apuntalante para pozos convencionales no hay una oportunidad de negocio mientras que para pozos no convencionales existe una oportunidad de negocio ya que la demanda futura prevé un aumento significativo.

En base a esta información se decidió estudiar 4 opciones de suplir esta demanda que en su orden son:

- **Opción 1:** COMPRA DE ARENA IMPORTADA A LAS COMPAÑIAS DE SERVICIO TECNICO.
- **Opción 2:** COMPRA DE ARENA NACIONAL A LAS COMPAÑIAS DE SERVICIO TECNICO.
- **Opción 3:** COMPRA DE ARENA IMPORTADA A UN INTERMEDIARIO.
- **Opción 4:** COMPRA DE ARENA NACIONAL A UN INTERMEDIARIO.

Estas cuatro opciones se comparan usa el indicador financiero VPN (Valor Presente Neto) con una tasa interna de retorno de 11.2% de la siguiente manera.

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + K)^t} - I_0$$

Dónde:

VPN es el valor presente neto del proyecto, US\$

Vt es el flujo de caja libre en cada periodo de tiempo, US\$

K es la tasa de descuento

Io es el valor del desembolso inicial de la inversión US\$

Tabla 42. Opción 1 compra de arena importada a las compañías de servicio técnico

| OPCION 1 COMPRA DE ARENA IMPORTADA A LAS COMPAÑIAS DE SERVICIO TECNICO | | | | | | | |
|---|---------|--------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------|--|
| AÑO | | 1 | | 2 | | 3 | |
| Convencionales | | | | | | | |
| Consumo de propante arena natural importado | | LB | 2.600.000 | 2.200.000 | 1.800.000 | | |
| Costo arena natural | \$ 0,60 | \$USD/lb | \$ 1.560.000 | \$ 1.320.000 | \$ 1.080.000 | | |
| No Convencionales | | | | | | | |
| Consumo de propante arena natural importado | | LB | 600.000 | 2.800.000 | 23.000.000 | | |
| Costo arena natural | \$ 0,60 | \$USD/lb | \$ 360.000 | \$ 1.680.000 | \$ 13.800.000 | | |
| Total | | | | | | | |
| COSTO ANUAL | | \$USD | \$ 1.920.000,00 | \$ 3.000.000,00 | \$ 14.880.000,00 | | |

| INDICADORES FINANCIEROS | |
|---------------------------------|---------------|
| WACC Tasa de descuento | 11.2% |
| Valor presente neto MUSD | \$ 14.974.263 |

Fuente: autor

Tabla 43. Opción 2 compra de arena nacional a las compañías de servicio técnico

| OPCION 2 COMPRA DE ARENA NACIONAL A LAS COMPAÑIAS DE SERVICIO TECNICO | | | | | |
|--|---------|--------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| AÑO | | 1 | 2 | 3 | |
| Convencionales | | | | | |
| Consumo de propante arena natural nacional | | LB | 3.120.000,00 | 2.640.000,00 | 2.160.000,00 |
| Costo arena natural | \$ 0,40 | \$USD/lb | \$ 1.248.000,00 | \$ 1.056.000,00 | \$ 864.000,00 |
| No Convencionales | | | | | |
| Consumo de propante arena natural nacional | | LB | 600.000,00 | 2.800.000,00 | 23.000.000,00 |
| Costo arena natural | \$ 0,40 | \$USD/lb | \$ 240.000,00 | \$ 1.120.000,00 | \$ 9.200.000,00 |
| Total | | | | | |
| COSTO ANUAL | | \$USD | \$ 1.488.000,00 | \$ 2.176.000,00 | \$ 10.064.000,00 |

| INDICADORES FINANCIEROS | |
|--------------------------------|---------------|
| WACC Tasa de descuento | 11,2% |
| Valor presente neto MUSD | \$ 10.416.949 |

Fuente: autor

Tabla 44. Opción 3 compra de arena importada a un intermediario

| OPCION 3 COMPRA DE ARENA IMPORTADA A UN INTERMEDIARIO | | | | | |
|--|---------|--------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| AÑO | | 1 | 2 | 3 | |
| Convencionales | | | | | |
| Consumo de propante arena natural importado-CST únicamente | | LB | 2.600.000,00 | 2.200.000,00 | 1.800.000,00 |
| Costo arena natural | \$ 0,60 | \$USD/lb | \$ 1.560.000,00 | \$ 1.320.000,00 | \$ 1.080.000,00 |
| No Convencionales | | | | | |
| Consumo de propante arena natural importado | | LB | 600.000,00 | 2.800.000,00 | 23.000.000,00 |
| Costo arena natural | \$ 0,40 | \$USD/lb | \$ 240.000,00 | \$ 1.120.000,00 | \$ 9.200.000,00 |
| Total | | | | | |
| COSTO ANUAL | | \$USD | \$ 1.800.000,00 | \$ 2.440.000,00 | \$ 10.280.000,00 |

| INDICADORES FINANCIEROS | |
|--------------------------------|---------------|
| WACC Tasa de descuento | 11,2% |
| Valor presente neto MUSD | \$ 11.068.109 |

Fuente: autor

Tabla 45. Opción 4 compra de arena nacional a un intermediario

| OPCION 4 COMPRA DE ARENA NACIONAL A UN INTERMEDIARIO | | | | | | | |
|---|---------|----------|-----------------|-----------------|------------------|---|--|
| AÑO | | 1 | | 2 | | 3 | |
| Convencionales | | | | | | | |
| Consumo de propante arena natural Colombiana-CST únicamente | | LB | 3.120.000,00 | 2.640.000,00 | 2.160.000,00 | | |
| Costo arena natural | \$ 0,47 | \$USD/lb | \$ 1.466.400,00 | \$ 1.240.800,00 | \$ 1.024.600,00 | | |
| No Convencionales | | | | | | | |
| Consumo de propante arena natural Colombiana | | LB | 600.000,00 | 2.800.000,00 | 23.000.000,00 | | |
| Costo arena natural | \$ 0,47 | \$USD/lb | \$ 282.000,00 | \$ 1.316.000,00 | \$ 10.810.000,00 | | |
| Total | | | | | | | |
| COSTO ANUAL | | \$USD | \$ 1.748.400,00 | \$ 2.556.800,00 | \$ 11.834.600,00 | | |

| INDICADORES FINANCIEROS | |
|--------------------------|---------------|
| WACC tasa de descuento | 11,2% |
| Valor presente neto MUSD | \$ 12.246.751 |

Fuente: autor

Anotación: Se tuvo en cuenta un incremento del precio debido al valor del Sand-Wedge que es un aditivo que se usa para mejorar la conductividad del arena.

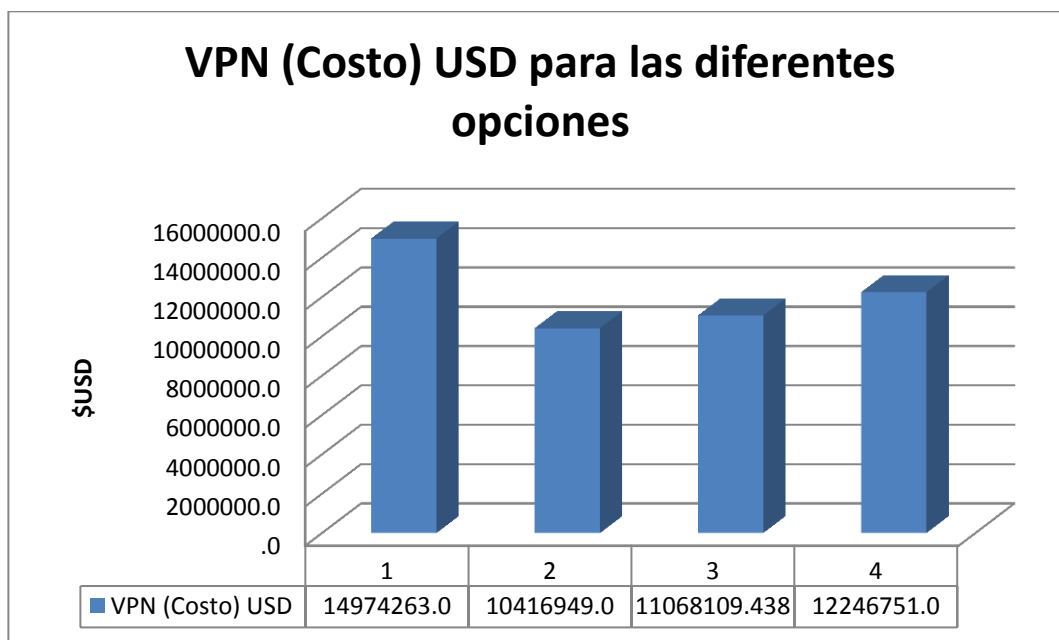
Tabla 46. Comparativo de VPN para las diferentes opciones

| Comparativo de VPN para las diferentes opciones | | |
|---|---|-----------------|
| Opción | Descripción | VPN (Costo) USD |
| 1 | Compra de arena importada a las compañías de servicio técnico | 14.974.263 |
| 2 | Compra de arena nacional a las compañías de servicio técnico | 10.416.949 |

| Comparativo de VPN para las diferentes opciones | | |
|---|--|-----------------|
| Opción | Descripción | VPN (Costo) USD |
| 3 | Compra de arena importada a un intermediario | 11.068.109 |
| 4 | Compra de arena nacional a un intermediario | \$ 12.246.751 |

Fuente: autor

Figura 53. Comparativo de VPN de las diferentes opciones.



Fuente: autor

Se obtuvo que la opción más favorable económicamente hablando es la compra de arena natural a compañías de servicio técnico, pero la opción más viable es la compra de arena natural a un intermediario ya que la industria productora de arena en Colombia aun esta por desarrollarse podría ser una buena opción para pozos pilotos.

7. GESTIÓN HSEQ Y AMBIENTAL.

7.1 LEGISLACIÓN MINERA EN COLOMBIA.

Actualmente en Colombia la industria minera está reglamentada por la ley 685 de 2001, la cual estipula que los minerales de cualquier clase y ubicación, yacentes en el suelo o el subsuelo, en cualquier estado físico natural, son de la exclusiva propiedad del Estado, sin consideración a que la propiedad, posesión o tenencia de los correspondientes terrenos, sean de otras entidades públicas, de particulares o de comunidades o grupos.

Además para el caso particular de canteras, establece que los propietarios de predios que de conformidad con el artículo 4° del Decreto 2655 de 1988, hubieren inscrito en el Registro Minero Nacional las canteras ubicadas en dichos predios, como descubiertas y explotadas antes de la vigencia de tal decreto, conservarán su derecho, en las condiciones y términos señalados en el presente Código.

7.1.1 Derecho a explorar y explotar. En cuanto a los títulos mineros se establece que, únicamente se podrá constituir, declarar y probar el derecho a explorar y explotar minas de propiedad estatal, mediante el contrato de concesión minera, debidamente otorgado e inscrito en el Registro Minero Nacional.

7.1.2 Zonas reservadas, excluidas y restringidas

- **Zonas de Seguridad Nacional.** El Gobierno Nacional podrá establecer sólo por razones de seguridad nacional, zonas dentro de las cuales no podrán presentarse propuestas ni celebrarse contratos de concesión sobre todos o determinados minerales. Esta reserva tendrá vigencia mientras, a juicio del Gobierno, subsistan las circunstancias que hubieren motivado su

establecimiento. En caso de ser abolida o modificada dicha reserva, en el mismo acto se determinará la forma como los particulares, en igualdad de condiciones, pueden presentar propuestas para contratar la exploración y explotación de las áreas, bajo el régimen ordinario de concesión.

- **Zonas excluibles de la minería.** No podrán ejecutarse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en zonas declaradas y delimitadas conforme a la normatividad vigente como de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente y que, de acuerdo con las disposiciones legales sobre la materia, expresamente excluyan dichos trabajos y obras.

- **Zonas de minería restringida.** Podrán efectuarse trabajos y obras de exploración y de explotación de minas en las siguientes zonas y lugares, con restricciones.
 - Dentro del perímetro urbano de las ciudades o poblados
 - En las zonas definidas como de especial interés arqueológico, histórico o cultural
 - En las playas, zonas de bajamar y en los trayectos fluviales
 - En las áreas ocupadas por una obra pública o adscritas a un servicio público
 - En las zonas constituidas como zonas mineras indígenas y negritudes

- **Ordenamiento Territorial.** En la elaboración, modificación y ejecución de los planes de ordenamiento territorial, la autoridad competente se sujetará a la información geológico-minera disponible sobre las zonas respectivas, así como lo dispuesto en el presente Código sobre zonas de reservas especiales y zonas excluibles de la minería.

7.1.3 El contrato de concesión. El contrato de concesión minera es el que se celebra entre el Estado y un particular para efectuar, por cuenta y riesgo de este, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse dentro de una zona determinada y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en este Código. Este contrato es distinto al de obra pública y al de concesión de servicios públicos.

El contrato de concesión comprende dentro de su objeto las fases de exploración técnica, explotación económica, beneficio de los minerales por cuenta y riesgo del concesionario y el cierre o abandono de los trabajos y obras correspondientes.

Al contrato de concesión le serán aplicables durante el término de su ejecución y durante sus prórrogas, las leyes mineras vigentes al tiempo de su perfeccionamiento, sin excepción o salvedad alguna. Si dichas leyes fueren modificadas o adicionadas con posterioridad, al concesionario le serán aplicables estas últimas en cuanto amplíen, confirmen o mejoren sus prerrogativas exceptuando aquellas que prevean modificaciones de las contraprestaciones económicas previstas en favor del Estado o de las de Entidades Territoriales.

7.1.4 Los trabajos de exploración

- **Trabajos de exploración.** Los estudios, trabajos y obras a que está obligado el concesionario durante el período de exploración por métodos de subsuelo, son los necesarios para establecer y determinar la existencia y ubicación del mineral o minerales contratados, la geometría del depósito o depósitos dentro del área de la concesión, en cantidad y calidad económicamente explotables, la viabilidad técnica de extraerlos y el impacto que sobre el medio ambiente y el entorno social puedan causar estos trabajos y obras.
- **Técnicas y especificaciones aplicables.** Los estudios, trabajos y obras propios de la exploración se ejecutarán con estricta aplicación de los criterios y

reglas de orden técnico, propios de las ciencias y prácticas de la geología y la ingeniería de minas, así como con las normas y guías adoptadas por el Gobierno.

- **Delimitación y devolución de áreas.** Al finalizar el período de exploración se deberá presentar la delimitación definitiva de la zona del área contratada que va a quedar vinculada a los trabajos y obras de explotación, más las obras estrictamente necesarias para el beneficio, transporte interno, servicios de apoyo y obras de carácter ambiental para lo cual se deberán tener en cuenta los valores, ubicación y cálculo de las reservas existentes, al igual que la producción esperada indicados en el Plan de Trabajos y Obras de explotación elaborado de acuerdo con el artículo 84 de este Código. Con oportunidad de esta delimitación, el concesionario estará obligado a devolver, en lotes contiguos o discontinuos, las partes del área que no serán ocupadas por los trabajos y obras mencionados. El área retenida deberá estar constituida por una extensión continua.

En todo caso, no se permitirá retener áreas en el contrato de concesión que no sean económicamente explotables.

El interesado, por razones de seguridad, podrá establecer una franja de terreno circundante de los lugares en los que se desarrollen los trabajos y de las zonas ocupadas por las instalaciones y obras.

- **Programa de trabajos y obras.** Como resultado de los estudios y trabajos de exploración, el concesionario, antes del vencimiento definitivo de este período, presentará para la aprobación de la autoridad concedente o el auditor, el Programa de Trabajos y Obras de Explotación que se anejará al contrato como parte de las obligaciones. Este programa deberá contener los siguientes elementos y documentos:

1. Delimitación definitiva del área de explotación.
2. Mapa topográfico de dicha área.
3. Detallada información cartográfica del área y si se tratare de minería marina especificaciones batimétricas.
4. Ubicación, cálculo y características de las reservas que habrán de ser explotadas en desarrollo del proyecto.
5. Descripción y localización de las instalaciones y obras de minería, depósito de minerales, beneficio y transporte y si es el caso, de transformación.
6. Plan Minero de Explotación, que incluirá la indicación de las guías técnicas que serán utilizadas.
7. Plan de Obras de Recuperación geomorfológica paisajística y forestal del sistema alterado.
8. Escala y duración de la producción esperada.
9. Características físicas y químicas de los minerales por explotarse.
10. Descripción y localización de las obras e instalaciones necesarias para el ejercicio de las servidumbres inherentes a las operaciones mineras.
11. Plan de cierre de la explotación y abandono de los montajes y de la infraestructura.

- **Estudio de Impacto Ambiental.** Simultáneamente con el Programa de Trabajos y Obras deberá presentarse el estudio que demuestre la factibilidad ambiental de dicho programa. Sin la aprobación expresa de este estudio y la expedición de la Licencia Ambiental correspondiente, por parte de la autoridad ambiental competente, no habrá lugar a la iniciación de los trabajos y obras de explotación minera. Las obras de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal del ecosistema alterado serán ejecutados por profesionales afines a cada una de estas labores. Dicha licencia con las restricciones y condicionamientos que imponga al concesionario, formarán parte de sus obligaciones contractuales.

7.1.5 Construcción y montaje mineros

- **Características.** Las construcciones, instalaciones y montajes mineros deberán tener las características, dimensiones y calidades señaladas en el Programa de Trabajos y Obras aprobado. Sin embargo, el concesionario podrá, durante su ejecución, hacer los cambios y adiciones que sean necesarios. Las autoridades minera y ambiental deberán ser informadas previamente de tales cambios y adiciones.
- **Obras de montaje.** El montaje minero consiste en la preparación de los frentes mineros y en la instalación de las obras, servicios, equipos y maquinaria fija, necesarios para iniciar y adelantar la extracción o captación de los minerales, su acopio, su transporte interno y su beneficio.
- **Obras de construcción.** Son las obras civiles de infraestructura indispensables para el funcionamiento normal de las labores de apoyo y administración de la empresa minera y las que se requieran para ejercitar las servidumbres de cualquier clase a que tiene derecho el minero.
- **Ubicación de las obras e instalaciones.** Las construcciones e instalaciones, distintas a las requeridas para la operación de extracción o captación de los minerales, podrán estar ubicadas fuera del área del contrato.
- **Plantas de transformación.** Si fuere indispensable para efectuar los trabajos de explotación integrar al complejo industrial de extracción y beneficio, plantas de procesamiento, éstas se deberán incluir en el montaje a petición del interesado. En este caso, el período para estas operaciones, podrá tener una duración adicional de dos (2) años, sin perjuicio de la prórroga ordinaria señalada en el artículo 74 de este Código.

Se entiende por transformación la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado, a través de un proceso industrial del cual resulte un producto diferente no identificable con el mineral en su estado natural.

7.1.6 Obras y trabajos de explotación

- **Naturaleza de la explotación.** La explotación es el conjunto de operaciones que tienen por objeto la extracción o captación de los minerales yacentes en el suelo o subsuelo del área de la concesión, su acopio, su beneficio y el cierre y abandono de los montajes y de la infraestructura. El acopio y el beneficio pueden realizarse dentro o fuera de dicha área.

El beneficio de los minerales consiste en el proceso de separación, molienda, trituración, lavado, concentración y otras operaciones similares, a que se somete el mineral extraído para su posterior utilización o transformación.

- **Iniciación.** El período de explotación comercial del contrato se inicia formalmente al vencimiento del período de construcción y montaje, incluyendo sus prórrogas. De esta iniciación se dará aviso por escrito a la autoridad concedente y a la autoridad ambiental. La fecha de la iniciación formal se tendrá en cuenta para todos los efectos del contrato, aunque el concesionario hubiere realizado labores de explotación anticipada de acuerdo con el artículo 94 de este Código.
- **Seguridad de personas y bienes.** En la construcción de las obras y en la ejecución de los trabajos de explotación, se deberán adoptar y mantener las medidas y disponer del personal y de los medios materiales necesarios para preservar la vida e integridad de las personas vinculadas a la empresa y eventualmente de terceros, de conformidad con las normas vigentes sobre seguridad, higiene y salud ocupacional.
- **Disposición de la producción.** El concesionario dispondrá libremente el destino de los minerales explotados y establecerá las condiciones de su enajenación y comercialización.

7.1.7 Terminación de la concesión

- **Renuncia.** El concesionario podrá renunciar libremente a la concesión y retirar todos los bienes e instalaciones que hubiere construido o instalado, para la ejecución del contrato y el ejercicio de las servidumbres.
- **Mutuo acuerdo.** El contrato de concesión podrá darse por terminado por mutuo acuerdo de las partes, caso en el cual se acordará todo lo relativo al retiro o abandono de los bienes e instalaciones del concesionario y a la readecuación y sustitución ambiental del área. De este evento se dará aviso a la autoridad ambiental.
- **Vencimiento del término.** A la terminación del contrato por vencimiento del plazo, incluyendo su prórroga, o por cualquier otra causa, el concesionario dejará en condiciones aptas para el uso normal de los frentes de trabajo utilizables, las obras destinadas al ejercicio de las servidumbres y las de conservación, mitigación y adecuación ambiental.
- **Muerte del concesionario.** El contrato termina por la muerte del concesionario. Sin embargo, esta causal de terminación sólo se hará efectiva si dentro de los dos (2) años siguientes al fallecimiento, los asignatarios no piden ser subrogados en los derechos emanados de la concesión, presentando la prueba correspondiente y pagando las regalías establecidas por la ley. En este caso, si posteriormente llegaren a ser privados de todo o parte de la mencionada concesión, el Estado no será responsable de ningún pago, reembolso o perjuicio a favor de ellos o de quienes hubieren probado un mejor derecho a suceder al primitivo concesionario.
- **Reversión gratuita.** En todos los casos de terminación del contrato, ocurrida en cualquier tiempo, operará la reversión gratuita de bienes en favor del Estado, circunscrita esta medida a los inmuebles e instalaciones fijas y permanentes, construidas y destinadas por el concesionario en forma exclusiva al transporte y al embarque de los minerales provenientes del área comprendida en tal contrato y de aquellas que se encuentren incorporadas a

los yacimientos y accesos y que no puedan retirarse sin detrimento del mismo (yacimiento) y de los frentes de trabajo. Esta reversión operará sólo en los casos en que las características y dimensiones de los mencionados bienes, a juicio de la autoridad minera, los hagan aptos como infraestructura destinada a un servicio público de transporte o embarque o darse al uso de la comunidad.

- **Obligaciones en caso de terminación.** El concesionario, en todos los casos de terminación del contrato, quedará obligado a cumplir o a garantizar las obligaciones de orden ambiental, exigibles al tiempo de hacerse efectiva dicha terminación. De igual manera, dará cumplimiento o garantizará sus obligaciones de orden laboral, reconocidas o causadas al momento de su retiro como concesionario.

7.2 LICENCIAS AMBIENTALES

7.2.1 Disposiciones generales

- **Autoridades ambientales competentes.** Son autoridades competentes para otorgar o negar licencia ambiental, conforme a la ley y al presente decreto, las siguientes:
 1. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
 2. Las Corporaciones Autónomas Regionales y las de Desarrollo Sostenible.
 3. Los municipios, distritos y áreas metropolitanas cuya población urbana sea superior a un millón de habitantes dentro de su perímetro urbano.
 4. Las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002.
- **Concepto y alcance de la licencia ambiental.** La Licencia Ambiental, es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual

sujeta al beneficiario de ésta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada.

La Licencia Ambiental llevará implícitos todos los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, que sean necesarios por el tiempo de vida útil del proyecto, obra o actividad.

El uso aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, deberán ser claramente identificados en el respectivo Estudio de Impacto Ambiental.

La Licencia Ambiental deberá obtenerse previamente a la iniciación del proyecto, obra o actividad. Ningún proyecto, obra o actividad requerirá más de una Licencia Ambiental.

7.2.2 Estudios Ambientales

- **De los estudios ambientales.** Los estudios ambientales a los que se refiere este título son el Diagnóstico Ambiental de Alternativas y el Estudio de Impacto Ambiental, que deberán ser presentados ante la autoridad ambiental competente.

Los estudios ambientales son objeto de emisión de conceptos técnicos, por parte de las autoridades ambientales competentes.

- **Diagnóstico Ambiental de Alternativas.** Objeto del Diagnóstico Ambiental de Alternativas. El Diagnóstico Ambiental de Alternativas -DAA, tiene como objeto suministrar la información para evaluar y comparar las diferentes opciones que presente el peticionario, bajo las cuales sea posible desarrollar un proyecto, obra o actividad. Las diferentes opciones deberán tener en cuenta el entorno geográfico, las características bióticas, abióticas y socioeconómicas, el análisis

comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad; así como las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas.

Lo anterior con el fin de aportar los elementos requeridos para seleccionar la alternativa o alternativas que permitan optimizar y racionalizar el uso de recursos y evitar o minimizar los riesgos, efectos e impactos negativos que puedan generarse.

7.2.3 Control y Seguimiento

- **Control y seguimiento.** Los proyectos, obras o actividades sujetos a licencia ambiental o Plan de Manejo Ambiental, serán objeto de control y seguimiento por parte de las autoridades ambientales, con el propósito de:
 1. Verificar la eficiencia y eficacia de las medidas de manejo implementadas en relación con el plan de manejo ambiental, el programa de seguimiento y monitoreo, el plan de contingencia, así como el plan de desmantelamiento y abandono y el plan de inversión del 1%, si aplican;
 2. Constatar y exigir el cumplimiento de todos los términos, obligaciones y condiciones que se deriven de la Licencia Ambiental o Plan de Manejo Ambiental;
 3. Corroborar el comportamiento de los medios bióticos, abióticos y socioeconómicos y de los recursos naturales frente al desarrollo del proyecto;
 4. Revisar los impactos acumulativos generados por los proyectos, obras o actividades sujetos a la licencia ambiental y localizados en una misma área de acuerdo con los estudios que para el efecto exija de sus titulares e imponer a cada uno de los proyectos las restricciones ambientales que considere pertinentes, con el fin de disminuir el impacto ambiental en el área;
 5. Verificar el cumplimiento de los permisos, concesiones o autorizaciones ambientales por el uso y/o utilización de los recursos naturales renovables, autorizados en la Licencia Ambiental;

6. Verificar el cumplimiento de la normatividad ambiental aplicable al proyecto, obra o actividad;
7. Verificar los hechos y las medidas ambientales implementadas para corregir las contingencias ambientales ocurridas;
8. Imponer medidas ambientales adicionales para prevenir, mitigar o corregir impactos ambientales no previstos en los estudios ambientales del proyecto;

En el desarrollo de dicha gestión, la autoridad ambiental podrá realizar entre otras actividades, visitas al lugar donde se desarrolla el proyecto, hacer requerimientos, imponer obligaciones ambientales, corroborar técnicamente o a través de pruebas los resultados de los monitoreos realizados por el beneficiario de la Licencia Ambiental o Plan de Manejo Ambiental.

7.3 REGULACIÓN DE DESCARGUE, TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE ESCOMBROS, MATERIALES, ELEMENTOS, CONCRETOS Y AGREGADOS SUELTOS, DE CONSTRUCCIÓN, DE DEMOLICIÓN Y CAPA ORGÁNICA, SUELO Y SUBSUELO DE EXCAVACIÓN.

- **En materia de transporte**

Los vehículos destinados para tal fin deberán tener involucrados a su carrocería los contenedores o platones apropiados, a fin de que la carga depositada en ellos quede contenida en su totalidad, en forma tal que se evite el derrame, pérdida del material o el escurrimiento de material húmedo durante el transporte.

Por lo tanto, el contenedor o platón debe estar constituido por una estructura continua que en su contorno no contenga roturas, perforaciones, ranuras o espacios. Los contenedores o platones empleados para este tipo de carga deberán estar en perfecto estado de mantenimiento.

La carga deberá ser acomodada de tal manera, que su volumen esté a ras del platón o contenedor, es decir, a ras de los bordes superiores más bajos del platón o contenedor. Además, las puertas de descargue de los vehículos que cuenten con ellas, deberán permanecer adecuadamente aseguradas y herméticamente cerradas durante el transporte.

No se podrá modificar el diseño original de los contenedores o platonos de los vehículos para aumentar su capacidad de carga en volumen o en peso en relación con la capacidad de carga del chasis.

Es obligatorio cubrir la carga transportada con el fin de evitar dispersión de la misma o emisiones fugitivas. La cobertura deberá ser de material resistente para evitar que se rompa o se rasgue y deberá estar sujeta firmemente a las paredes exteriores del contenedor o platón, en forma tal que caiga sobre el mismo por lo menos 30 cm a partir del borde superior del contenedor o platón.

Si además de cumplir con todas las medidas a que se refieren los anteriores numerales, hubiere escape, pérdida o derrame de algún material o elemento de los vehículos en áreas de espacio público, este deberá ser recogido inmediatamente por el transportador para lo cual deberá contar con el equipo necesario.

- **En materia de cargue, descargue y almacenamiento**

El espacio público que vaya a utilizarse para el almacenamiento temporal de los materiales y elementos para la construcción, adecuación, transformación o mantenimiento de obras públicas, deberá ser debidamente delimitado, señalizado y optimizado al máximo su uso con el fin de reducir las áreas afectadas.

Está prohibido el cargue, descargue o el almacenamiento temporal o permanente de los materiales y elementos para la realización de obras públicas sobre zonas verdes, áreas arborizadas, reservas naturales o forestales y similares, áreas de recreación y parques, ríos, quebradas, canales, caños, humedades y en general cualquier cuerpo de agua.

Las áreas de espacio público destinadas a la circulación peatonal solamente se podrán utilizar para el cargue, descargue y el almacenamiento temporal de materiales y elementos, cuando se vayan a realizar obras públicas sobre estas mismas áreas u otras obras subterráneas que coincidan con ellas.

El cargue, descargue y el almacenamiento temporal de los materiales y elementos para la realización de obras públicas destinadas para el tráfico vehicular, se llevará a cabo en las mismas áreas y para el efecto, el material deberá ser acordonado y apilado adecuadamente y deberán colocarse todos los mecanismos y elementos adecuados requeridos para garantizar el tránsito vehicular y las señalizaciones necesarias para la seguridad de conductores y peatones.

El tiempo máximo permitido para el almacenamiento del material no podrá exceder de veinticuatro horas después de la finalización de la obra o actividad.

Para la utilización de las demás áreas de espacio público no mencionadas, en desarrollo de actividades de cargue, descargue y almacenamiento temporal de los materiales y elementos para la realización de obras públicas, deberá comunicarse la situación a la autoridad ambiental competente, indicando en detalle el tiempo requerido para culminar la obra, la delimitación del área que se va a utilizar, las condiciones de almacenamiento del material y la restauración del área cuando se retire el material.

En todos los casos, con posterioridad a la finalización de las obras se deberá recuperar y restaurar el espacio público utilizado, de acuerdo con su uso y garantizando la reconfiguración total de la infraestructura y la eliminación absoluta de los materiales, elementos y residuos, en armonía con lo dispuesto en esta resolución.

Tratándose de obras privadas se observará lo siguiente: Está prohibido el cargue, descargue y almacenamiento temporal o permanente, de los materiales y elementos a que se refiere esta resolución, sobre las áreas de espacio público, en desarrollo de la construcción, adecuación, mantenimiento o uso general de obras, actividades, instalaciones y fuentes de material de carácter privado.

Los sitios, instalaciones, construcciones y fuentes de material deberán contar dentro de los límites del inmueble privado, con áreas o patios donde se efectúa el cargue, descargue y almacenamiento de este tipo de materiales y elementos y con sistemas de lavado para las llantas de los vehículos de carga, de tal manera que no arrastren material fuera de esos límites, con el fin de evitar el daño al espacio público.

En los sitios seleccionados como lugares de almacenamiento temporal, tanto para obras públicas como privadas, no deben presentarse dispersiones o emisiones al aire de materiales, no deben mezclarse los materiales a que hace referencia esta resolución con otro tipo de residuos sólidos, líquidos o gaseosos; y cuando los materiales almacenados sean susceptibles de producir emisiones atmosféricas, ya sean o no fugitivas, deberán cubrirse en su totalidad o almacenarse en recintos cerrados.

- **En materia de disposición final**

Está prohibida la disposición final de los materiales y elementos a que se refiere esta resolución en áreas de espacio público.

La persona natural o jurídica, pública o privada que genere tales materiales y elementos debe asegurar su disposición final de acuerdo a la legislación sobre la materia.

Está prohibido mezclar los materiales y elementos a que se refiere esta resolución con otro tipo de residuos líquidos o peligrosos y basuras, entre otros.

8. CONCLUSIONES

- En cuanto al tamaño de arena natural 20/40, El propante importado LWC, RCP es la mejor opción técnico económica para un esfuerzo neto superior a 4000psi.
- En cuanto al tamaño 30/50, La compra de arena importada a un intermediario diferente a la CST sigue siendo la mejor opción técnico económica.
- El propante, arena colombiana, para las muestras evaluadas, requiere de un aditivo mejorador de conductividad para su aplicación, lo que no las hace viable económicamente.
- La aplicación de la arena Colombiana 30/50 + SMA, como una fracción del programa de bombeo, es una buena opción para el fracturamiento de los pozos Pilotos Verticales.
- El proceso de fabricación de propantes en base arena natural a nivel local es artesanal y esto impacta negativamente la calidad del producto final por lo cual no son viables técnicamente.
- Arenas provenientes de zonas montañosas no son favorables para la calidad del material propante ya que han sufrido tectonismo lo que microfractura los granos de arena.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda profundizar en la búsqueda de fuentes de la materia prima para la fabricación del material propante, teniendo en cuenta las condiciones geológicas que se presentan en las minas estadounidenses es decir zonas donde no le haya sufrido tectonismo o sea muy poco y formaciones más o menos de la misma edad geológica.
- Para futuras evaluaciones de arenas se recomienda la implementación de un diseño experimental el cual garantice la confiabilidad de los resultados obtenidos.
- Es hace necesario un profundo estudio de los procesos de fabricación del material propante, tales como el lavado, secado, y clasificación, que permitan hacer un cierre de brechas en cuanto a la calidad de los propantes en cuanto a los estadounidenses.

BIBLIOGRAFÍA

- CASTILLO, Rubén; LEAL Alirio, propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas. Bucaramanga, Colombia 2011.
- DAZA MARTÍNEZ, Libardo. Estudio de proyectos de inversión. Bogotá, Colombia. 1991. 46 p
- ECONOMIDES, Michael. Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production. Houston TX: ET Publishing 2007. 536 p.
- HERRERA HERBERT, Juan. Métodos de minería a cielo abierto. Madrid España. 2007. 119 p.
- HYDROFRAC SAND MINING: THE RESOURCE AND THE ISSUES. *Bruce A. Brown Ph.D., P.G. Senior Geologist. Wisconsin Geological and Natural History Survey, Madison, WI. WCCA Conference Baraboo WI October 13 2011.*
- International Organization for Standardization. ISO 13503-2 "Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations". 2006.
- MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos. Segunda edición. México. D.F.: Editorial Limusa S.A. de C.V. grupo noriega editores. 1995. 692 p.

- ORTIZ, Julián. Apuntes de curso de explotación de minas. lugar: Santiago de Chile, Chile. 2007. Disponible en <https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/MI57E/1/.../158888>.
- SERRANO SERRANO, Daniel factibilidad técnica y económica del uso de propantes ultralivianos en el fracturamiento hidráulico de pozos: aplicación en un campo colombiano. Bucaramanga, Colombia 2011.