

CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS PRELIMINARES DE CONCENTRACIÓN  
DE ARENAS PROCEDENTES DE UNA ZONA MINERA DE SANTA MARTA, CON  
POTENCIAL PARA SER USADAS EN EL PROCESO DE FRACTURAMIENTO  
HIDRÁULICO

KATHERIN STEFANY HERRERA COTE  
HERNANDO GALVIS CASTRO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

CARACTERIZACIÓN Y PRUEBAS PRELIMINARES DE CONCENTRACIÓN  
DE ARENAS PROCEDENTES DE UNA ZONA MINERA DE SANTA MARTA, CON  
POTENCIAL PARA SER USADAS EN EL PROCESO DE FRACTURAMIENTO  
HIDRÁULICO

KATHERIN STEFANY HERRERA COTE  
HERNANDO GALVIS CASTRO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO METALÚRGICO

DIRECTOR  
WALTER PARDAVÉ LIVIA  
M.Sc. EN INGENIERÍA METALÚRGICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Al culminar este proceso tan maravilloso, lleno de experiencias únicas y extraordinarias, como autores de este proyecto manifestamos la extensión de agradecimientos a todos aquellos que lo permitieron e hicieron parte de él; en ese sentido la intención va dirigida a :

La escuela de Ingeniería Metalúrgica, tanto a su personal docente, como administrativo, por el invaluable apoyo que prestaron a lo largo de todos los semestres para brindar de manera acertada el proceso de formación integral , tanto en lo académico como en lo personal .

Nuestro director, M.Sc. Walter Pardavé Livia, quién nos dio la oportunidad de contribuir en esta investigación, además de brindarnos su acompañamiento y asesoramiento en el desempeño de realización del proyecto.

Los técnicos de la escuela por la atención y disposición prestada al momento de cualquier inquietud, y la debida asistencia en la aplicación de pruebas necesarias para el proyecto.

El personal externo adjunto a la sede de Guatiguará por facilitarnos las pruebas de rayos X para la caracterización de la arena.

La empresa minera de Santa Marta como facilitadora de la materia prima para la realización del presente proyecto.

Y en otros temas vinculados al proyecto, a todos los que de alguna u otra manera estuvieron presentes brindándonos su apoyo en lo académico y lo personal.

Gracias Totales.

## DEDICATORIA KATHERIN HERRERA

*Primeramente a Dios, por su sabiduría, por transmitirme la fuerza para alcanzar éste logro, que es parte de un ciclo que decidí empezar a forjar, y por guiar con paciencia como con perseverancia ésta meta, ha sido toda una aventura que al final es recompensada por la inmensa satisfacción y felicidad de verla culminada.*

*Así mismo a mi madre Marlene Cote, con quién compartí un camino arduo para ver consolidado este proyecto de vida, por su misión de ser incondicional, de ser consejera, de ser especialmente paciente, a quién le debo todo esto y más, por esas razones siempre será mi esencia de inspiración e impulso, de esta manera expreso todo mi agradecimiento y admiración a ella. A mi abuela por dejarme el legado de “Ser alguien”, y que aunque ya lo soy , el hecho de trabajar por algo más hace que tomen más sentido sus palabras, fue quién sembró en mí, esa admiración por su ímpetu característico para lidiar los obstáculos , a quién siempre recordare en la infinitud .*

*A mi familia por ser la escalera para darle inicio a este reto en el gran viaje de la vida, por su comprensión y prestarme siempre su apoyo, los llevo siempre en mi corazón.*

*A mi amigo y compañero de proyecto Hernando Galvis por su paciencia, compromiso y lucha para sumar fuerzas en terminar este trayecto, para el cual fue una persona esencial.*

*Y a mis amigos, compañeros y profesores con quienes emprendí una gran travesía y con quienes he compartido momentos de gran aprendizaje.*

## DEDICATORIA HERNANDO GALVIS C.

*Iniciar agradeciendo a Dios que es fuente de vida y sabiduría; esa poderosa fuerza invisible que todo lo puede y que todo transforma. Aquella misma que en momentos de dificultades, debilidad e incertidumbre anduvo a mi lado mostrándome el camino para sobreponerme y seguir adelante para permitirme ver culminada esta etapa en el camino.*

*A mis padres que siempre han confiado en mí y que me han entregado todo su amor y apoyo incondicionalmente. A ellos, que han sabido brindarme la más valiosa educación y los mejores consejos, siempre les estaré en deuda y eternamente agradecido.*

*A la Universidad Industrial Santander y todos aquellos profesores que a través de estos años fueron fuente de conocimiento y que acompañaron de la mejor manera mi proceso de formación académica. A compañeros y amigos con los que coincidí en las aulas, gracias.*

*A mi amiga y coautora del presente trabajo, Katherine Herrera, con quien hemos trabajado de manera ardua y mancomunada para ver cumplido un mismo objetivo.*

*A mi novia, María Yulieth, quien me ha brindado todo su apoyo y ha estado a mi lado durante momentos en los que se siente más no poder. A ella mi gratitud y cariño.*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. OBJETIVOS .....	15
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
2. MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. ANTECEDENTES DE LAS ARENAS EN EL FRACKING .....	16
2.2. FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO O FRACKING .....	16
2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ARENAS .....	17
2.4. PROPIEDADES DE LAS ARENAS USADAS EN FRACKING.....	18
2.4.1 Alto contenido de sílice .....	18
2.4.2. Tamaño de grano.....	19
2.4.3 Esfericidad y redondez.....	19
2.5. OPERACIONES DE BENEFICIO DE MINERALES .....	20
2.5.1 Trituración .....	20
2.5.2 Molienda .....	21
2.5.3 Concentración gravimétrica en mesa wilfley .....	21
2.5.4 Separación magnética .....	22
3. METODOLOGÍA .....	23
3.1. ETAPA 1: Caracterización mineralógica de la muestra.....	23
3.2. ETAPA 2: Caracterización química de la muestra .....	23
3.3. ETAPA 3: Caracterización granulométrica de la muestra .....	23
3.4. ETAPA 4: Establecimiento de las etapas de procesamiento mediante pruebas preliminares para la caracterización física. ....	24
3.5. ETAPA 5: Caracterización física de la muestra.....	24

3.6. ETAPA 6: Diseño del flujograma.....	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA. ....	25
4.1.2. Clasificación por Streckeisen de la muestra de roca.....	<b>26</b>
4.1.3 Esfericidad y redondez.....	27
4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA.....	29
4.2.1 Análisis por fluorescencia de rayos x de la muestra de roca .....	29
4.3 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA .....	30
4.3.1 Proceso de conminución.....	30
4.3.2 Primera etapa de trituración.....	30
4.3.3 Segunda etapa de trituración .....	31
4.3.4 Primera etapa de molienda.....	32
4.3.5 Segunda etapa de molienda .....	33
4.4 ETAPAS DE PROCESAMIENTO Y PRUEBAS PRELIMINARES MEDIANTE TÉCNICAS GRAVIMÉTRICAS Y DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA .....	35
4.4.1 Separación gravimétrica en mesa Wilfley .....	35
4.4.2 Separación magnética .....	37
4.5 BALANCE DE MATERIA .....	38
4.5.1 DESCRIPCIÓN DEL FLUJOGRAMA DEL PROCESO.....	38
5. CONCLUSIONES .....	41
6. RECOMENDACIONES .....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS.....	46

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las arenas según su composición y su tamaño de grano. .....	17
Tabla 2. Descripción mineralógica de la muestra recibida.....	25
Tabla 3. Recalculo para clasificación de streckeisen de la muestra. ....	27
Tabla 4. Resultados de la relación Redondez/Esfericidad de los granos .....	28
Tabla 5. Resultados de FRX para la composición de la muestra de mineral.....	29
Tabla 6. Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la primera etapa de trituration. ....	31
Tabla 7. Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la segunda etapa de trituration. ....	32
Tabla 8. Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la primera etapa de molienda. ....	33
Tabla 9. Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la primera etapa de molienda. ....	34
Tabla 10. Resultados obtenidos mediante la separación gravimétrica .....	36
Tabla 11. Resultados obtenidos mediante la separación magnética .....	37
Tabla 12. Composición de la arena como producto final para fracturamiento hidráulico .....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tabla Krumbein & Sloss para determinar el número de grano en términos de su esfericidad y redondez .....	20
Figura 2. Muestra de roca recibida. ....	25
Figura 3. Ubicación de los porcentajes dentro de la gráfica de Streckeisen de la muestra recibida. ....	27
Figura 4. Tabla Krumbein & Sloss para determinar el número de grano en términos de su esfericidad y redondez .....	28
Figura 5. Espectrometría de fluorescencia de rayos X para la muestra procesada. ....	30
Figura 6. Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la primera etapa de trituración. ....	31
Figura 7. Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la segunda etapa de trituración. ....	32
Figura 8. Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la primera etapa de molienda. ....	33
Figura 9. Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la segunda etapa de molienda. ....	34

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Selección de granos estudiados en el análisis visual.....	46
Anexo B. Resultados obtenidos en el análisis de fluorescencia de rayos x.....	46
Anexo C. Diagrama de flujo de balance de materia general.....	47
Anexo D. Diagrama de Balance de materia por etapas con cálculos .....	48

## RESUMEN

- TITULO:** Caracterización y pruebas preliminares de concentración de arenas procedentes de una zona minera de Santa Marta, con potencial para ser usadas en el proceso de fracturamiento hidráulico.\*
- AUTORES:** Galvis,Hernando y Herrera,Katherin\*\*
- PALABRAS CLAVE:** BENEFICIO DE MINERALES, ARENAS SILÍCEAS, FRACKING.

En el presente proyecto se realizó la caracterización y pruebas preliminares de concentración de las arenas provenientes de una zona minera ubicada en la ciudad Santa Marta, a fin de evaluar su potencial para ser usadas en el proceso de fracturamiento hidráulico. Esta caracterización se realizó con la ayuda de técnicas de fluorescencia de rayos X, clasificación mediante el diagrama Streckeissen, técnicas de beneficio de minerales tales como trituración, molienda, etapas de procesamiento para separación gravimétrica y magnética y un proceso final pirometalúrgico, con el fin de aumentar el porcentaje de concentración de sílice, mediante la remoción de minerales de hierro y otros componentes no deseables. Adicionalmente se diseñó un flujograma con balance de materia del proceso completo para la obtención de arenas de fractura. Los resultados obtenidos mediante la caracterización química arrojaron una composición mineralógica de 62,5% de cuarzo ( $\alpha$ ) y 34% de alúmina principalmente, junto con otros componentes como magnetita, y óxidos de calcio, magnesio y zinc entre otros. Una vez realizadas las pruebas de beneficio de minerales se logró aumentar la concentración de sílice hasta un 79%, donde posteriormente a través de la adición de un proceso pirometalúrgico dentro del flujograma se planteó aumentar esta concentración hasta un 99% de  $\text{SiO}_2$ , obteniéndose la pureza deseada para las arenas de fractura.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: M.Sc. Walter Pardavé L.

## ABSTRACT

- TITLE:** Characterization and preliminary testing of sand concentration from a Santa Marta mining zone, with potential to be used in the hydraulic fracturing process. \*
- AUTHORS:** Galvis,Hernando y Herrera,Katherin \*\*
- KEYWORDS:** BENEFICIATION OF MINERALS, SILICA SANDS, FRACKING.

The present project was intended to characterize and make preliminary concentration tests of the sands from a mining zone located in the city of Santa Marta, to evaluate its potential to be used in the hydraulic fracturing process. This characterization was made by means of x-ray fluorescence spectroscopy, mineralogical classification by using the Streckeisen diagram and techniques of minerals beneficiation such as crushing and gridding and processing stages for gravimetric and magnetic separation, and a final pyrometallurgical process in order to increase the concentration percentage of silica through the removal of ferrous minerals and other undesirable compounds remaining from the other processes. Additional to this, it was design a flow chart with mass balance of the whole process for the obtaining of the fracking sands. The results obtained from the chemical characterization produced a mineralogical composition of 62.5 % of Quartz and 34% of alumina mostly, together with other compounds such as iron, calcium, magnesium and Zinc oxides among other. Once the mineral beneficiation tests were made, it was possible to increase the silica concentration up to 79%, so lately trough the addition of a pyrometallurgical process to the flow chart, which was set out to increase this concentration up to a 99% of SiO<sub>2</sub>, acquiring the desire purity for the fracking sands.

---

\*Grade work

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering.  
School of Metallurgical Engineering and Materials Science.  
Director: M.Sc. Walter Pardavé L.

## INTRODUCCIÓN

La drástica disminución de reservas de pozos petroleros convencionales ha llevado a los gobiernos y sectores minero-energéticos a utilizar un método denominado “no convencional” para la extracción de estos hidrocarburos a partir de yacimientos de tipo shale y tight, entre otros. Este método no convencional conocido como fracking, consiste en el fracturamiento hidráulico de las rocas de baja permeabilidad para lograr que los gases e hidrocarburos distribuidos en pequeños poros aislados entre sí, logren interconectarse y fluir más fácilmente hacia la superficie<sup>1</sup>.

Para hacer posible el fracturamiento de la roca, se bombea a altas presiones grandes cantidades de una mezcla de agua, arena de fractura y químicos. Al producirse la fractura, este tipo de arenas es precisamente la que brinda estabilidad, evitando que la grietas se cierren al detenerse el bombeo y permitiendo así el paso de los fluidos hacia la superficie<sup>2</sup>.

En Colombia, las arenas silíceas que se producen son consumidas en su totalidad por la industria local, siendo sus principales usos la fabricación de vidrio, el sector de la construcción y la industria siderúrgica. Sin embargo, con el anuncio de la Agencia Nacional de Hidrocarburos para dar inicio a los programas piloto de fracking, se abre la posibilidad de un amplio mercado para la masiva producción y comercialización de arenas de fracturamiento<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Beckwith, Robin, 2011, Proppants—where in the world: Journal of Petroleum Technology, April 2011, p. 36–41. [Consultado el 16-02-2020]

<sup>2</sup> S. Charry-Ocampo y A. J. Perez, “Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: Implicaciones en el contexto colombiano,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 28, no. 1, pp. 135-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2549>[Consultado el 14-02-2020]

<sup>3</sup> Abderraouf Kamel, Zineb Salem, Rachida Chemini, Mohamed Khodja & Khedidja Allia (2019) Characterization of natural sand proppant used in hydraulic fracturing fluids, *Particulate Science and Technology*, 37:6, 712-720, DOI: 10.1080/02726351.2018.143854. [Consultado el 27-02-2020]

En la ciudad de Santa Marta, actualmente las arenas que abundan en las zonas cercanas al mar son empleadas para hacer agregados de construcción donde su valor económico es bajo. Por consiguiente, en el presente proyecto se busca darle un mayor valor agregado, realizando la caracterización y las pruebas preliminares necesarias para obtener el producto que es utilizado como relleno en las técnicas de fracturamiento hidráulico, mediante procesos de beneficio de minerales limpios, como lo son las técnicas gravimétricas.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar y realizar pruebas preliminares de concentración de arenas de una zona minera de Santa Marta, con potencial para ser usadas como arcillas para el proceso de fracturamiento hidráulico.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Caracterizar física, química, granulométrica y mineralógicamente la arena proveniente de la zona minera de Santa Marta.

Establecer las etapas de procesamiento de las arenas mediante técnicas gravimétricas y de separación magnética con pruebas preliminares a nivel de laboratorio.

Proponer un flujograma con balance de material como procedimiento para la obtención de arcillas utilizadas en el proceso de fracturamiento hidráulico, empleando datos de las pruebas preliminares efectuadas y datos de referencias bibliográfica.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ANTECEDENTES DE LAS ARENAS EN EL FRACKING**

Durante los últimos 15 años, con la perfección horizontal y el aumento de las perforaciones combinadas vertical y horizontalmente, muchos países a nivel mundial han logrado aumentar notablemente sus reservas de hidrocarburos y su volumen de producción; esto consecuentemente ha llevado a cifras record el consumo de arenas de fractura. Las estimaciones apuntan a que el consumo de estas arenas para el 2025 estará alrededor de las 300 millones de toneladas a nivel mundial. Ésta alta demanda abre una gran posibilidad para su producción y exportación en Colombia, donde apenas es una industria en crecimiento donde para 2020 apenas se registra una producción de cerca de 390.000 toneladas de arenas silíceas.

### **2.2. FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO O FRACKING**

El Fracturamiento Hidráulico es una técnica de estimulación implementada para aumentar la productividad en pozos de petróleo y gas, consiste en la perforación a grandes profundidades de más de 2500m de un conducto por donde se hace circular una mezcla de agua, arenas y químicos, dónde el agua a grandes presiones cumple la función de romper la roca, la arena mantenerla separada como sostén gracias a su permeabilidad y los químicos de disolver los combustibles que se recircularan para su posterior refinamiento.

### 2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS ARENAS

**Tabla 1.** Clasificación de las arenas según su composición y su tamaño de grano.

<p><b>POR SU COMPOSICIÓN QUÍMICA</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cuarzosas: El material principal predominante es cuarzo.</li><li>• Silíceas: Cuando los materiales predominantes son silicatos o feldespatos:</li><li>• Calcáreas: Cuando el material predominante es la caliza.</li></ul>
<p><b>POR EL TAMAÑO DE SUS GRANOS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Arenas gruesas: Las que pasan una malla de 5mm y son retenidas por otra de 2mm (entre -3.5 y +9 mallas Taylor)</li><li>• Arenas medias: Las que pasan una malla de 2mm y son retenidas por otra de 0.5mm (entre -9 y +32 mallas Taylor).</li><li>• Arenas finas: Las que pasan una malla de 0.5mm y son retenidas por otra de 0.02mm (entre -32 y + 80 mallas Taylor).</li><li>• Agregados artificiales (arenas, gravas, matatenas): Se obtienen de la disgregación mecánica de rocas mayores, como el basalto (trituration, cribado y selección).</li></ul>

## **2.4. PROPIEDADES DE LAS ARENAS USADAS EN FRACKING**

Las especificaciones para las arenas de fracturamiento están basadas en los estándares determinados por el Instituto Americano del Petróleo (API) y por la organización internacional para la estandarización (ISO). Los estándares actuales API/ISO están definidos en la norma API RP 19C e ISO 13503-2:2006 “*Recommended Practice for Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations*”, la cual dicta los procedimientos que deben seguirse para evaluar, obtener y comparar las propiedades físicas de los apuntalantes.

**2.4.1 Alto contenido de sílice:** Las arenas de fractura premium contienen porcentajes mayores a 99% de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), aunque la mayoría de las arenas utilizadas para fracking están dentro de un rango de 95-99% de pureza. La pureza mineralógica del sílice es una característica de arenas maduras, las cuales han sido altamente clasificadas de manera que aquellos minerales finos y menos resistentes química y mecánicamente han sido descartados o disueltos<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Benson, Mary E. & Wilson, Ana B, Frac Sand in the United States—A Geological and Industry Overview, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2015, Zdunczyk, Mark, 2014, Hydraulic fracturing sand (frac sand): Mining Engineering, v. 66, no. 7, p. 53–55. [Consultado el 18-03-2020]

**2.4.2. Tamaño de grano:** Generalmente el rango de tamaños de grano se encuentra entre 0.1 y 2mm de diámetro. Esto equivale a tamaños de tamices de entre 100 a >2000  $\mu\text{m}$ . Los tamaños de grano de las muestras son designados mediante notaciones tales como 20/40, 30/50, 40/70 dependiendo del caso, lo cual indica el rango de tamices donde es retenido el 90% de la muestra. Por ejemplo, para una arena 20/40, el 90% pasó la malla 20 y fue retenido en la malla 40<sup>5</sup>. Tamaños de grano muy grandes proveen mayor permeabilidad, pero tamaños pequeños son más resistentes. El tamaño de grano ideal está determinado por las condiciones de perforación y la complejidad del diseño, pero los más comúnmente usados para fracking de petróleo son 20/40 y 30/50, mientras que para fracking de gas son 40/70 y 70/140<sup>6</sup>.

**2.4.3 Esfericidad y redondez:** Los factores de esfericidad y redondez se determinan mediante estimación visual basados en la tabla Krumbein & Sloss. A mayor relación redondez/esfericidad, mejor relación porosidad/permeabilidad se tendrá, permitiendo un mejor flujo del petróleo o el gas desde las fracturas hacia la superficie. La norma API RP 19C establece que ambos valores deben estar por encima de 0.6<sup>7</sup>.

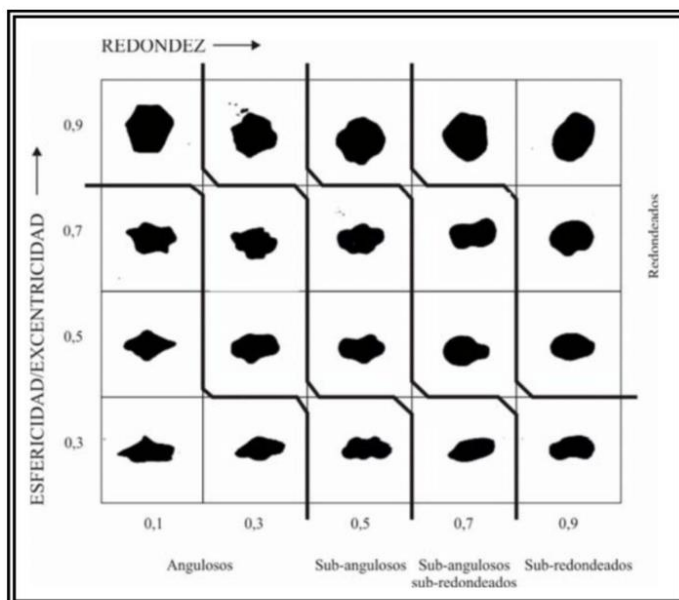
---

<sup>5</sup> Pettijohn, F.J., Potter, P.E., and Siever, Raymond, 1972, Sand and sandstone: New York, Springer Verlag, 87 p. [Consultado el 26-03-2020]

<sup>6</sup> Rupke, A., and Boden, T., 2014, Frac sand potential in Utah (abs.): 2014 Society of Mining, Metallurgy & Exploration Annual Meeting and Exhibit—Leadership in uncertain times, Preliminary Program, Salt Lake, Utah, February 23–26, p. 40. [Consultado el 10-03-2020]

<sup>7</sup> Gallegos, T. J., & Varela, B. A. (2014). Trends in Hydraulic Fracturing Distributionsand Treatment Fluids, Additives, Proppants, and Water Volumes Applied to Wells Drilled in the United States from 1947 through 2010—Data Analysis and Comparison to the Literature. [Consultado el 24-04-2020]

**Figura 1.** Tabla Krumbein & Sloss para determinar el número de grano en términos de su esfericidad y redondez



## 2.5. OPERACIONES DE BENEFICIO DE MINERALES

**2.5.1 Trituración:** Proceso de reducción de materiales comprendido entre los tamaños de entrada de un metro a un centímetro (0,01m), diferenciándose en trituración primaria (de 1 m a 10 cm) y trituración secundaria (de 10 cm a 1 cm). Este proceso implica sólo una transformación física de la materia sin alterar su naturaleza. La trituración representa un paso fundamental a partir del cual se realizan los procesos de conminución posteriores<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Grbeš, A. Life Cycle Assessment of Silica Sand Exploitation and Processing in Croatia. Ph.D. Thesis, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Zagreb, Croatia, 22 May 2014. [Consultado el 15-04-2020]

**2.5.2 Molienda:** Es un proceso mediante el cual se reduce el tamaño del material mineralizado a menos de 0,2 milímetros, de manera que sea adecuado para tratamientos posteriores como separación gravimétrica, magnética y flotación. Al material mineralizado que viene de la planta de chancado se le agrega agua y algunos reactivos, y se lleva a los molinos de barra y de bolas. Los molinos giran y las barras o bolas muelen el material debido a la colisión entre partículas<sup>9</sup>.

**2.5.3 Concentración gravimétrica en mesa wilfley:** Las mesas concentradoras son de vital importancia en la industria minera debido a que ayudan a separar en diferentes fases las arenas y minerales, de manera que finalmente se puedan recuperar aquellas de mayor interés comercial.

Esta separación es posible debido a las diferentes densidades y granulometría del material de alimentación del sistema, teniendo adicionalmente como característica importante de las mesas Wilfley, el uso de tecnologías que contribuyen con el medio ambiente, ya que no se usan ningún reactivo químico para realizar la separación<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Suzan S. Ibrahim , Ali Q. Selim & Ayman A. Hagrass (2013) Gravity Separation of Silica Sands for Value Addition, Particulate Science and Technology, 31:6, 590-595, DOI 10. 1080 /02 7263 51.201 3.800930 Tomado de: <http://dx.doi.org/10.1080/02726351.2013.800930>. [Consultado el 11-05-2020]

<sup>10</sup> Legorreta, García F., Olvera, Venegas P.N., Caracterización y Estudio de Separación Gravimétrica de Arenas de Arcillas Caoliníticas Procedentes de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (México), Universidad autónoma del estado de hidalgo, 2017 , ISBN: 978-607-9023-17-1 [Consultado el 10-04-2020]

**2.5.4 Separación magnética:** Debido a que asociado una muestra de material pueden encontrarse otros tipos de minerales o elementos, en muchos procesos de beneficio de minerales se utilizan técnicas para separar aquellas partículas que exhiben una respuesta a campos electromagnéticos para de éste modo concentrar eficientemente el/los minerales de mayor interés comercial. Los separadores magnéticos más usados en la minería son el separador de tubo Davis y el separador de tambor, entre otros<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> OBERTEUFFER, John. Magnetic Separation: A review of principles, devices, and applications. En: Transactions on magnetics, Vol. Mag-10, No. 2, 1974. [Consultado el 11-04-2020]

### **3. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del proyecto se plantearon y se desarrollaron las siguientes etapas con el propósito de alcanzar los objetivos:

#### **3.1. ETAPA 1: Caracterización mineralógica de la muestra**

Con el fin de realizar la caracterización mineralógica se procedió (mediante análisis visual a través de estereoscopio) a identificar los atributos particulares en la muestra, de modo que nos permitiera distinguir a que grupo de rocas pertenecía. Además se determinó el porcentaje de composición de los minerales presentes y finalmente se efectuó la clasificación mediante el diagrama de Streckeisen.

#### **3.2. ETAPA 2: Caracterización química de la muestra**

Para determinar la composición exacta de la muestra recibida, se aplicó la técnica de fluorescencia de rayos X a una masa de 3 g de muestra obtenida mediante cuarteo y triturada mediante mortero de ágata, obteniendo una composición química con la que se hizo el análisis de las variables necesarias para las consecuentes etapas en el proceso de beneficio de minerales.

#### **3.3. ETAPA 3: Caracterización granulométrica de la muestra**

A fin de obtener la granulometría necesaria para realizar las pruebas de separación de componentes no deseables como óxidos de hierro, zinc, manganeso entre otros, se efectuó la reducción de tamaños empleando la trituradora de mandíbulas, cónica y el molino de bolas.

#### **3.4. ETAPA 4: Establecimiento de las etapas de procesamiento mediante pruebas preliminares para la caracterización física.**

Se establecieron las etapas para llevar a cabo la caracterización física de la muestra y se analizó la influencia de 2 variables (Tamaño de partícula y número de ciclos de procesamiento) en la eficiencia del proceso de concentración gravimétrica y separación magnética.

#### **3.5. ETAPA 5: Caracterización física de la muestra**

Para los procesos de caracterización granulométrica se tuvo en cuenta la norma ISO 13503-2:2006. Se aplicó la técnica de separación gravimétrica mediante la mesa Wilfley a las muestras tamizadas, así mismo, se realizó el proceso de separación magnética a los concentrados pesados provenientes de la separación gravimétrica para eliminar los minerales magnéticos contenidos en la muestra.

#### **3.6. ETAPA 6: Diseño del flujograma**

Con las etapas operativas establecidas y con la ayuda de datos bibliográficos, se procedió a realizar un flujograma con el balance de material en términos de masa para el procedimiento de obtención de las arenas para fracturamiento hidráulico.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA.

**4.1.1. Descripción mineralógica de la muestra recibida:** Como se observa en la figura 2, se pudo identificar mediante el análisis visual a través del estereoscopio, que la muestra tenía granitoide con una textura fanerítica, equigranular, y que estaba compuesto de manera uniforme por minerales máficos y félsicos. Como minerales esenciales estaban el cuarzo, plagioclasa, hornblenda, biotita y como accesorio la magnetita. En la tabla 2 se muestran los porcentajes de composición mineralógica de la muestra analizada.

**Figura 2.** Muestra de roca recibida.



**Tabla 2.** Descripción mineralógica de la muestra recibida.

<b>Descripción mineralógica</b>	
Porcentaje mineral	%
Cuarzo (Q)	20%
Plagioclasa (P)	30%
Mafico(hornblenda y biotita)	50%

**4.1.2. Clasificación por Streckeisen de la muestra de roca:** A partir de los datos de composición mineralógica obtenidos se planteó realizar la reclasificación de dichos porcentajes mediante el diagrama de Streckeisen.

Para esta reclasificación, se procedió a identificar cuáles de los minerales que se observan en la tabla 2, también se encontraban en el triángulo superior del diagrama de Streckeisen. Al contrastar los datos, se pudo identificar que, de los tres minerales de la parte superior del diagrama de Streckeisen (Cuarzo, feldespatos y plagioclasas), solo se tenían dos presentes en la tabla 2 (Cuarzo y plagioclasas) los cuales suman un 50% del total de la composición total de la roca.

Por tanto, asumiendo este 50% como si fuera nuestro nuevo 100% de composición, se obtuvo los nuevos porcentajes de reclasificación como se muestra a continuación:

$$\begin{array}{r} 20\% Q \\ X \end{array} \quad \begin{array}{r} 50\% \\ 100\% \end{array}$$

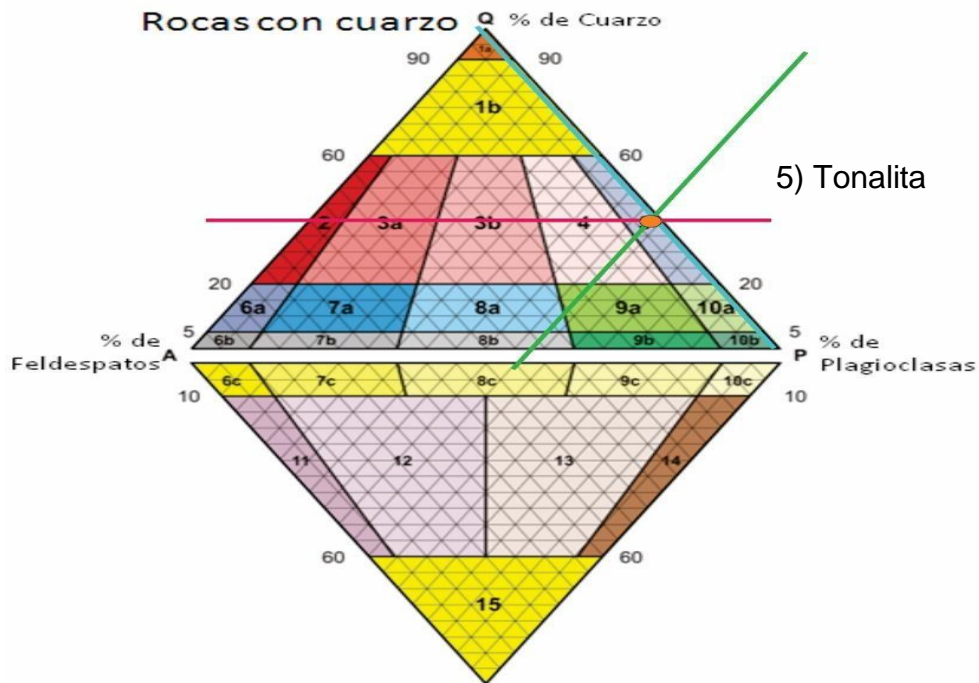
- $X(\text{nuevo } \%Q) = 40\%$
- $\text{Nuevo } \%P = 100\% - 40\% = 60\%P$

En la tabla 3 se presenta los resultados del recalcu de clasificación de la muestra. Al ubicar estos porcentajes en el diagrama de Streckeisen, como se observa en la figura 3, se encontró que el punto de intercepción de composiciones quedó en la zona 5, permitiéndonos clasificar la muestra de roca como una roca plutónica de tipo tonalita.

**Tabla 3.** Recálculo para clasificación de streckeisen de la muestra.

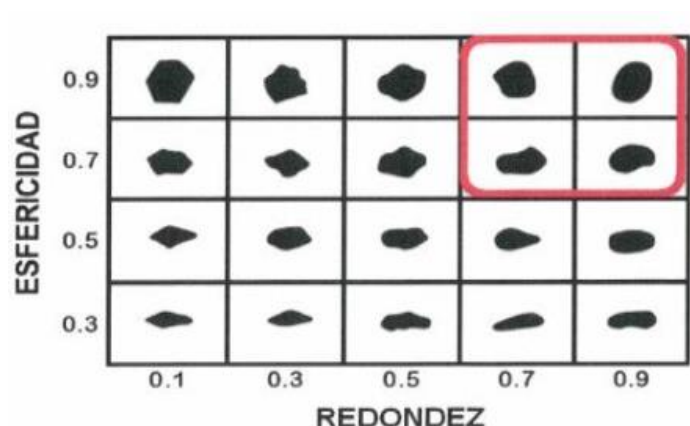
<b>Recálculo para clasificación por streckeisen</b>		
TIPO DE ROCA	TONALITA	
		Nuevos porcentajes
Cuarzo (Q)	20%	40%
Plagioclasa (P)	30%	60%
Feldespato alcalino(A)	0%	0%
<b>total</b>	50%	100%

**Figura 3.** Ubicación de los porcentajes dentro de la gráfica de Streckeisen de la muestra recibida.



**4.1.3 Esfericidad y redondez:** El análisis se realizó con ayuda del cuarteador tomando una muestra inicial de 20 g, llegando a una muestra reducida de 1 a 2 gramos, de la cual se eligieron 5 granos al azar y se examinaron de forma visual mediante binocular de 10x.

**Figura 4.** Tabla Krumbein & Sloss para determinar el número de grano en términos de su esfericidad y redondez



Según el estudio visual de los granos de la arena mostrado en el apéndice A se determinó que se configuran dentro del recuadro señalado en la figura 4, es decir su promedio estuvo en ese rango, así que en ese orden, basándose en la relación Redondez/Esfericidad se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 4.** Resultados de la relación Redondez/Esfericidad de los granos

Grano	Relación
1	$0.7/0.9 = 0.77$
2	$0.7/0.7 = 1$
3	$0.9/0.9 = 1$
4	$0.9/0.7 = 1.28$
5	$0.9/0.9 = 1$

Por lo que efectivamente según los datos de la tabla 4 se cumple con la norma, que establece que los valores de la relación deben superiores a 0.6 en el caso de las arenas.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

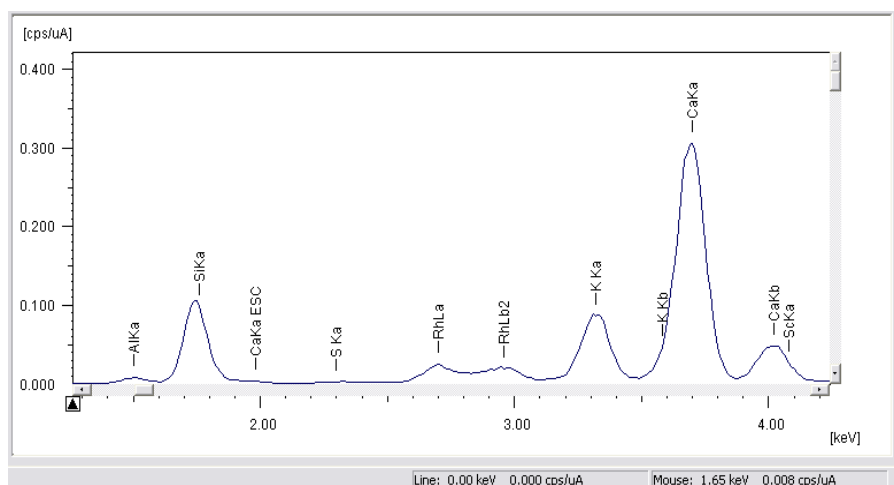
**4.2.1 Análisis por fluorescencia de rayos x de la muestra de roca:** La muestra fue pulverizada en un mortero de ágata hasta un tamaño de partícula de 200 mallas, y posteriormente secada a 110°C. Una porción de 3 gramos fue mezclada con 0.9 g de polvo de almidón y se preparó la briqueta para ubicarla dentro del espectrómetro.

A través del análisis de los resultados de fluorescencia de rayos x, se encontró que las rocas estaban compuestas por un 62,5% de cuarzo y un 34% de alúmina mayoritariamente y en pequeñas proporciones contenía magnetita, rutilo, óxido de manganeso y zinc como se observa en el apéndice B de los anexos. Los principales componentes presentes en la muestra se observan en la tabla 5 y la gráfica de espectrometría de fluorescencia de rayos se observa en la figura 5.

**Tabla 5.** Resultados de FRX para la composición de la muestra de mineral

COMPUESTO	PORCENTAJE PRESENTE EN LA MUESTRA
SiO <sub>2</sub>	62.465 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.002%
CaO	1.453%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.196%
K <sub>2</sub> O	0.600%

**Figura 5.** Espectrometría de fluorescencia de rayos X para la muestra procesada.

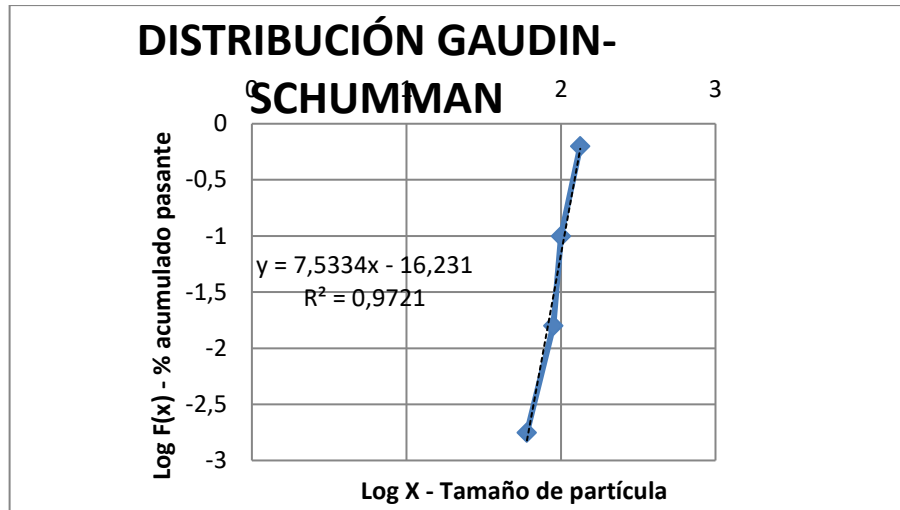


### 4.3 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA

**4.3.1 Proceso de conminución:** Para realizar las pruebas de separación de componentes no deseables como óxidos de hierro, zinc, óxido de manganeso, rutilo y otros; se efectuaron la reducción de tamaños empleando trituradora de mandíbulas y molino de bolas.

**4.3.2 Primera etapa de trituración:** El tamaño de entrada del mineral cabeza fue de 10". Al realizar la primera trituración en el triturador de mandíbulas se redujo el mineral a un tamaño de 6". La distribución granulométrica obtenida se muestra en la figura 6 de distribución Gaudin-Schumman.

**Figura 6.** Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la primera etapa de trituración.



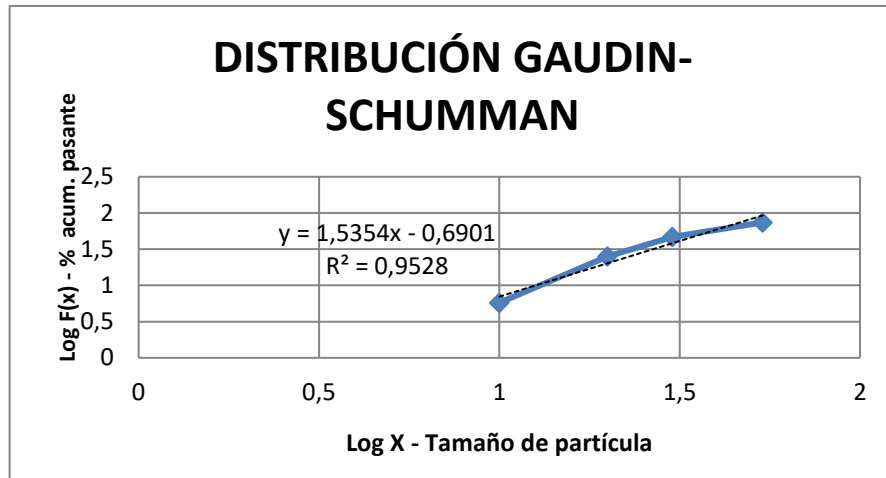
**Tabla 6.** Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la primera etapa de trituración.

P80	
Xo	148.69 mm
Apertura	144.55 mm
Tamaño	6"

**4.3.3 Segunda etapa de trituración:** La segunda trituración se llevó a cabo en un triturador cónico donde finalmente se obtuvo un tamaño de partícula de 2". La Gráfica de distribución granulométrica Gaudin – Schumman para la segunda etapa de trituración se muestra en la figura 7.

Posteriormente, una tercera trituración se llevó a cabo también en un triturador cónico donde se obtuvo un tamaño de partícula de 1/4". Este tamaño precisamente, era el óptimo para alimentación del molino de bolas en la siguiente etapa.

**Figura 7.** Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la segunda etapa de trituración.

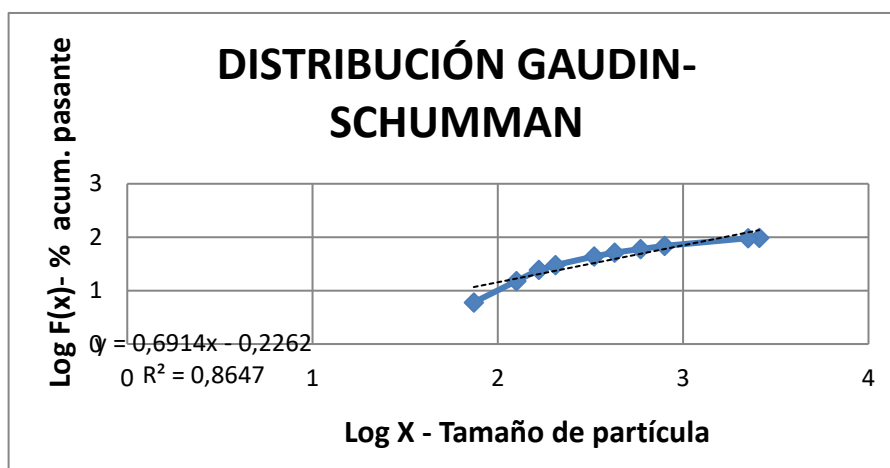


**Tabla 7.** Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la segunda etapa de trituración.

P80	
Xo	56.93 mm
Apertura	49.42 mm
Tamaño	2"

**4.3.4 Primera etapa de molienda:** La primera etapa de moliendo se realizó por un tiempo de 15 minutos donde se redujo el mineral a un tamaño de 850 micrómetros pasante malla #10. La distribución granulométrica Gaudin – Schumman para la primera etapa de molienda se muestra en la figura 8.

**Figura 8.** Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la primera etapa de molienda.

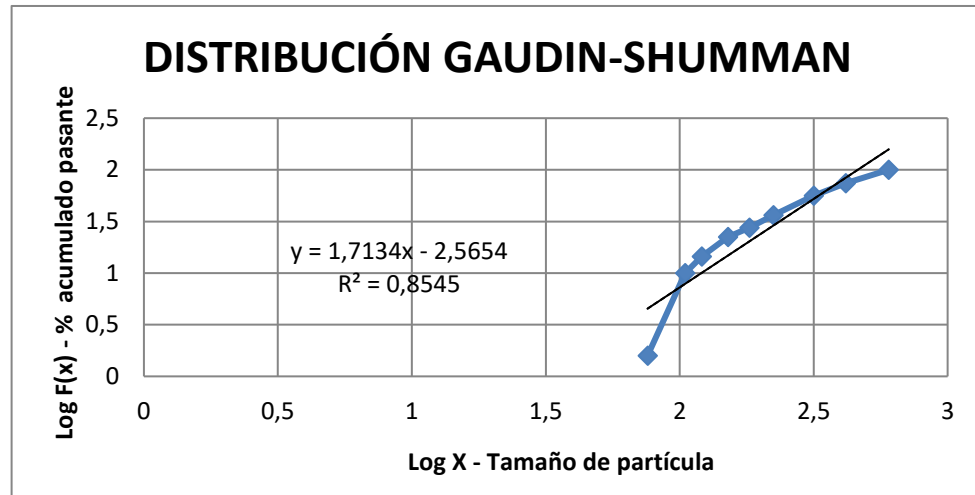


**Tabla 8.** Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la primera etapa de molienda.

P80	
Xo	1.68 mm
Apertura	1.22 mm
Malla	#10

**4.3.5 Segunda etapa de molienda:** La segunda etapa de molienda se realizó por un tiempo de 30 minutos donde se redujo las partículas a un tamaño final de 406 micras, pasante malla # 40. En la figura 9 se observa la distribución granulométrica Gaudin – Schumman para la segunda etapa de molienda.

**Figura 9.** Distribución granulométrica Gaudin-Schumman después de la segunda etapa de molienda.



**Tabla 9.** Tamaño máximo de partícula P80 obtenido en la primera etapa de molienda.

P80	
Xo	0.461 mm
Apertura	0.406 mm
Malla	#40

Al finalizar el proceso de conminución se obtuvo finalmente un tamaño máximo de partícula para el P80 de 0.461 mm pasante malla #40, como se observa en la tabla 9. Este tamaño fue considerado como óptimo para realizar las pruebas subsiguientes de concentración gravimétrica y de separación magnética.

## **4.4 ETAPAS DE PROCESAMIENTO Y PRUEBAS PRELIMINARES MEDIANTE TÉCNICAS GRAVIMÉTRICAS Y DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA**

### **4.4.1 Separación gravimétrica en mesa Wilfley**

**4.4.1.1 Preparación de la pulpa:** Para el proceso de concentración en la mesa Wilfley se tenían 2 granulometrías diferentes; una con tamaños de partícula de malla 70/100 y otra con tamaños de partícula de malla 100/200. La pulpa de alimentación estaba compuesta por un 30% de sólidos.

**4.4.1.2 Establecimiento de las variables operativas:** Para el proceso de concentración gravimétrica se mantuvo constante el ángulo de inclinación de la mesa (12°), el flujo de alimentación y la velocidad de vibración. Solo se realizó cambios en las variables de tamaño de partícula y el número de ciclos de concentración aplicados para cada tamaño de partícula.

Inicialmente se realizó el proceso de concentración para las partículas de malla 70/100. La suspensión de sólidos alimentados por la parte superior de la mesa se fue clasificando de acuerdo a su densidad a medida que avanzaban a través de los rifles de la mesa, obteniéndose como resultado final dos tipos de concentrados: Ligeros y pesados.

Los concentrados ligeros se recircularon para someterlos a un segundo ciclo en la mesa Wilfley y los pesados (con contenido de hierro) fueron enviados a la etapa de separación magnética. Este mismo procedimiento anteriormente descrito fue aplicado para los tamaños de partícula 100/200.

**4.4.1.3 Resultados obtenidos en la separación gravimétrica:** Una vez realizados los cuatros procesos de separación, se tomaron muestras de los concentrados pesados y se analizaron mediante FRX. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.

**Tabla 10.** Resultados obtenidos mediante la separación gravimétrica

Muestra	Granulometría	Contenido de Fe (%)	Remoción de Fe (%)
Inicial	-	0.8	-
Un ciclo	70/100m	0.15	81.5%
Dos ciclos	70/100m	0.07	90.1%
Un ciclo	100/200m	0.14	82.4%
Dos ciclos	100/200m	0.11	85.6%

Como se observa en los resultados de la tabla 10, inicialmente se logró un porcentaje de remoción de hierro de 81.5% para la granulometría 70/100 sometida a un ciclo en la mesa de concentración. Sin embargo, cuando los concentrados ligeros se sometieron a un segundo ciclo de concentración, el porcentaje de remoción de hierro subió hasta un 90.1% lográndose así una alta efectividad en el proceso.

Por otro lado, para la granulometría 100/200 se obtuvo un porcentaje de remoción de hierro de 82.4% para un primer ciclo de concentración. Posteriormente, cuando los ligeros obtenidos de este primer ciclo se sometieron a un segundo ciclo de concentración, solo se logró aumentar el porcentaje de remoción de hierro hasta un 85.6%.

De esta manera se pudo establecer que, para estos cuatro procesos de concentración, la mayor eficiencia de remoción de hierro se logró cuando se sometió la muestra de granulometría 70/100 a un total de 2 ciclos.

## 4.4.2 Separación magnética

**4.4.2.1 Preparación de la pulpa:** Para el proceso de concentración en la mesa Wilfley se tenían 2 granulometrías diferentes; una con tamaños de partícula de malla 70/100 y otra con tamaños de partícula de malla 100/200. La pulpa de alimentación estaba compuesta por un 23,73% de sólidos.

**4.4.2.2 Establecimiento de las variables operativas:** Se trabajó con la misma velocidad de flujo volumétrico tanto para el tamaño de 70/100 como para el tamaño de malla 100/200, inicialmente se realizó un ciclo de separación magnética con la granulometría de 70/100 del que se obtuvieron dos corrientes, una con el concentrado metálico y otra donde con el material no magnético. Posteriormente se realizó un segundo ciclo y se tabularon los resultados obtenidos para ambas granulometrías.

**Tabla 11.** Resultados obtenidos mediante la separación magnética

Muestra	Granulometría	Contenido de Fe (%)	Remoción de Fe (%)
Inicial	-	0.8	-
Un ciclo	70/100m	0.13	83.5%
Dos ciclos	70/100m	0.04	95.1%
Un ciclo	100/200m	0.17	80.4%
Dos ciclos	100/200m	0.09	87.6%

Según los resultados de la tabla 11, inicialmente se logró un porcentaje de remoción de hierro de 83.5% para la granulometría 70/100 sometida a un ciclo en el separador magnético. Sin embargo, cuando los concentrados no metálicos se sometieron a un segundo ciclo de concentración, el porcentaje de remoción de hierro subió hasta un 95.1% lográndose así una alta efectividad en el proceso.

Por otro lado, para la granulometría 100/200 se obtuvo un porcentaje de remoción de hierro de 80.4% para un primer ciclo de concentración. Posteriormente, cuando

el material no magnético obtenido de este primer ciclo se sometió a un segundo ciclo de concentración, solo se logró aumentar el porcentaje de remoción de hierro hasta un 87.6%.

De esta manera se pudo establecer que, para estos cuatro procesos de concentración, la mayor eficiencia de remoción de hierro se logró cuando se sometió la muestra de granulometría 70/100 a un total de 2 ciclos.

## **4.5 BALANCE DE MATERIA**

### **Proceso de tratamiento**

El tratamiento tiene por objetivo principal la obtención de los diferentes tipos de arenas con las calidades que requieren las industrias de perforación, de acuerdo a la normativa existente mencionada anteriormente a través de balances de materia como el establecido a continuación.

El balance se encuentra en los anexos, apéndices C y D.

**4.5.1 DESCRIPCIÓN DEL FLUJOGRAMA DEL PROCESO:** El diagrama de flujo que se muestra en el apéndice 2 de los anexos, se describe el proceso de beneficio de minerales más común para la obtención de arenas de fractura:

El proceso inicia con la extracción de las rocas o arenas que contienen el mineral valioso a partir del cual puede obtenerse el concentrado de sílice. Estudios previos de caracterización mineralógica y química permitirán conocer la composición aproximada de toda la mina a partir de la cual se establecerán las variables operativas para el proceso de beneficio.

En el presente proyecto los resultados de análisis químico arrojaron una composición de estas rocas ígneas de tipo tonalita correspondiente a 62.45% de cuarzo, 34% de alúmina, y otra cantidad de óxidos en menores proporciones. Por

tanto, asumiendo una base de cálculo de una tonelada para los balances del proceso, las masas alimentación iniciales de cada mineral fueron las que se indican en el flujograma como m1 con tamaños promedio de partícula de 10".

El proceso de conminución inició con una primera etapa en una trituradora de mandíbula donde se redujeron los tamaños de partícula hasta un diámetro promedio de 6" con flujos de salida m2. Posteriormente debido al diámetro de salida de las partículas fue necesario realizar una segunda trituración del mineral, esta vez en un triturados cónico, de manera que se pudiera reducir el mineral a tamaños óptimos para el proceso de molienda. Al realizar esta segunda trituración se obtuvo tamaños de partícula de 2" en promedio, con flujos de salida m3. Finalmente, una segunda trituración en el triturador cónico, permitió obtener el tamaño de partícula adecuado para la etapa de molienda (1/4") con flujos de salida m4 como se observa en el flujograma.

Se realizaron dos procesos de molienda. En el primero se redujo los tamaños de partícula hasta un tamaño de 850 micras con flujos de salida m5 y posteriormente se realizó un segundo ciclo de molienda donde finalmente se obtuvo tamaños de partícula de 406 micras.

Siguiendo con el proceso de obtención de arenas silíceas, los productos de la segunda molienda fueron llevados a un hidrociclón tipo embudo. Se utilizó una pulpa de alimentación con 30% de sólidos en suspensión y 70 % de agua. Al final del proceso se obtuvieron los flujos de salida M7 que se observan en el flujograma, los cuales pasan al proceso de separación gravimétrica.

El proceso continua con una separación gravimétrica en la mesa Wilfley en donde su alimentación se basa en el material que viene de la corriente del hidrociclón, con una eficiencia de remoción de Fe del 90.1%, con un remanente de otro material pesado, con la obtención de dos corrientes una vez finalizado, una con los livianos de masa m8 y otra de material pesado con masa m8.1, este último pasa a una etapa en horno rotatorio el cual tiene un porcentaje de secado de 100% dejando el concentrado con una masa final de masa m8.2.

Posteriormente la corriente de livianos pasa a ser la alimentación del separador magnético , el cual posee un rendimiento de 95.1 % de remoción de Fe, realizada la etapa se obtienen dos corrientes , una con el material magnético húmedo m9 en el cuál por acción de arrastre del agua queda un concentrado con presencia de alúmina y otra corriente con el concentrado húmedo del mineral objetivo del estudio m10 ,el mineral al serle removido el hierro deja un material no magnético con algún residuo o presencia de hierro pero en una mínima cantidad ,además al haberse dado en un proceso de vía húmeda queda un residuo de agua por lo que el mineral se encuentra húmedo con una masa de m10 , a continuación pasa por un proceso de calcinación a temperatura de 1000°C en horno, finalizando en la perdida de una parte de material obteniéndose una masa de m11 con la composición que se muestra en la tabla 12.

**Tabla 12.** Composición de la arena como producto final para fracturamiento hidráulico

<b>Resultado arena seca</b>		
<b>Item</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Porcentaje por compuesto</b>
M11	189,22	N.A.
m11 SiO2	187,41	99,04%
m11 Al2O3	0,80	0,42%
m11 Fe2O3	0,02	0,01%
m11 otros magnéticos	0,13	0,07%
m11 otros no magnéticos	0,86	0,45%
M11 Agua (kg)	0,00	0,00%
Tamaño 11	406 μ	N.A.
		100,0%

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la reclasificación de los porcentajes de composición mineralógica en el diagrama de Streckeisen, se encontró que la muestra proveniente de la zona minera de Santa Marta se trataba de una roca ígnea plutónica conocida como tonalita. Así mismo, mediante el análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos x, se determinó los porcentajes de composición de la muestra; estos correspondieron a un 62.46% de cuarzo, 34.00 % de alúmina mayoritariamente, y además con 1.196% de magnetita y 2.344% de otros minerales.

Mediante el proceso de conminución se llegó finalmente a un tamaño de grano P80 de 0.46 mm, pasante malla #40, el cual era el tamaño ideal para efectuar la caracterización física mediante concentración por mesa Wilfley, donde se logró un porcentaje máximo de remoción de hierro de 90.1% cuando el mineral de granulometría 70/100 fue sometido a dos ciclos de concentración. Finalmente, mediante el proceso de separación magnética de los concentrados pesados provenientes de la clasificación por mesa Wilfley, se logró una remoción de hierro de 95.1% cuando el mineral de granulometría 70/100 fue sometido a dos ciclos.-Se establecieron las etapas de procesamiento para las pruebas preliminares mediante la técnica gravimétrica de concentración del mineral mediante mesa Wilfley.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo constatar que de las dos variables que se analizaron (Tamaño de partícula y número de ciclos) la que más influencia tuvo en la eficiencia de remoción de hierro, fue la de variación número de ciclos de concentración, lográndose un aumento de 8.6% en la eficiencia de remoción del hierro al aumentar de 1 a 2 ciclos el proceso de concentración para la granulometría 70/100. Caso similar sucedió en las pruebas preliminares de separación magnética donde al pasar de 1 a 2 ciclos de separación, se logró un aumento del 11.6% en la eficiencia de remoción del hierro para la granulometría 70/100.

A partir del balance de masa de la arena se logró llegar a una composición del 99,04% de Sílice ,0.42% de Alúmina 0,01% de óxido de hierro, 0.07% de otros magnéticos y 0.45% de otros no magnéticos, gracias al manejo del rendimiento de las etapas de beneficio dónde se aprovechó la máxima capacidad de la arena, demostrándose el gran potencial que supone esta arena dentro del mercado de fracturamiento hidráulico.

## 6. RECOMENDACIONES

Debido a que mediante las técnicas gravimétricas y de separación magnética propuestas sólo se logró alcanzar un 79% de pureza de las arenas silíceas, no pudo realizarse una comparación objetiva con respecto a las propiedades ideales standard consignadas en la norma API RP 19C "*Recommended Practice for Measurement of Properties of Proppants Used in Hydraulic Fracturing and Gravel-packing Operations*". La razón, es que esta norma asume un 99% de pureza de las arenas silíceas para medir sus propiedades y establecer el standard.

Por este motivo, queda abierta la posibilidad para posteriores trabajos de grado la medición de propiedades tales como resistencia a la rotura, turbiedad, esfericidad y redondez, resistencia a los ácidos y solubilidad una vez se haya alcanzado un 99% de pureza después de realizado el proceso pirometalúrgico propuesto en el presente trabajo de grado.

## BIBLIOGRAFÍA

Beckwith, Robin, 2011, Proppants—where in the world: *Journal of Petroleum Technology*, April 2011, p. 36–41.

S. Charry-Ocampo y A. J. Perez, “Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: Implicaciones en el contexto colombiano,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 28, no. 1, pp. 135-164. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2549>

Abderraouf Kamel, Zineb Salem, Rachida Chemini, Mohamed Khodja & Khedidja Allia (2019) Characterization of natural sand proppant used in hydraulic fracturing fluids, *Particulate Science and Technology*, 37:6, 712-720, DOI: 10.1080/02726351.2018.1438542

Benson, Mary E. & Wilson, Ana B, *Frac Sand in the United States—A Geological and Industry Overview*, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2015  
Zdunczyk, Mark, 2014, Hydraulic fracturing sand (frac sand): *Mining Engineering*, v. 66, no. 7, p. 53–55.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., and Siever, Raymond, 1972, *Sand and sandstone*: New York, Springer Verlag, 87 p.

Rupke, A., and Boden, T., 2014, Frac sand potential in Utah (abs.): 2014 Society of Mining, Metallurgy & Exploration Annual Meeting and Exhibit—Leadership in uncertain times, Preliminary Program, Salt Lake, Utah, February 23–26, p. 40.

Gallegos, T. J., & Varela, B. A. (2014). Trends in Hydraulic Fracturing Distributionsand Treatment Fluids, Additives, Proppants, and Water Volumes Applied to Wells Drilled in the United States from 1947 through 2010—Data Analysis and Comparison to the Literature.

Grbeš, A. Life Cycle Assessment of Silica Sand Exploitation and Processing in Croatia. Ph.D. Thesis, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Zagreb, Croatia, 22 May 2014.

OBERTEUFFER, John. Magnetic Separation: A review of principles, devices, and applications. En: Transactions on magnetics, Vol. Mag-10, No. 2, 1974.

W, Griem, apuntes de geología, Denominación según Streckeisen (QAPF), Chile, 2020 tomado de: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap04a.htm>

Legorreta, García F., Olvera, Venegas P.N., Caracterización y Estudio de Separación Gravimétrica de Arenas de Arcillas Caoliníticas Procedentes de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo (México), Universidad autónoma del estado de hidalgo, 2017 , ISBN: 978-607-9023-17-1

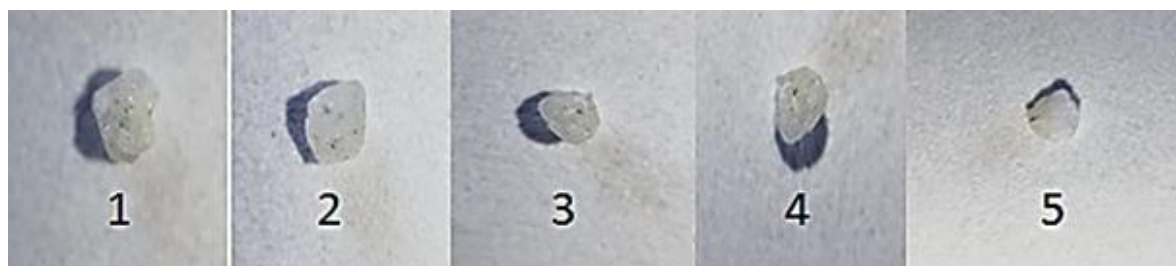
Suzan S. Ibrahim , Ali Q. Selim & Ayman A. Hagrass (2013) Gravity Separation of Silica Sands for Value Addition, Particulate Science and Technology, 31:6, 590-595, DOI: 10.1080/02726351.2013.800930  
Tomado de: <http://dx.doi.org/10.1080/02726351.2013.800930>

Marguí, E. et al., 2011. Aplicación de la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos-X en el estudio de la dispersión de metales en áreas mineras. Boletín Geológico y Minero, 122 (2): 273-286 ISSN: 0366-0176

G. Mariano, Actualidad de los agentes de sostén, 2018. Revista petrotécnica. Páginas 26-35

## ANEXOS

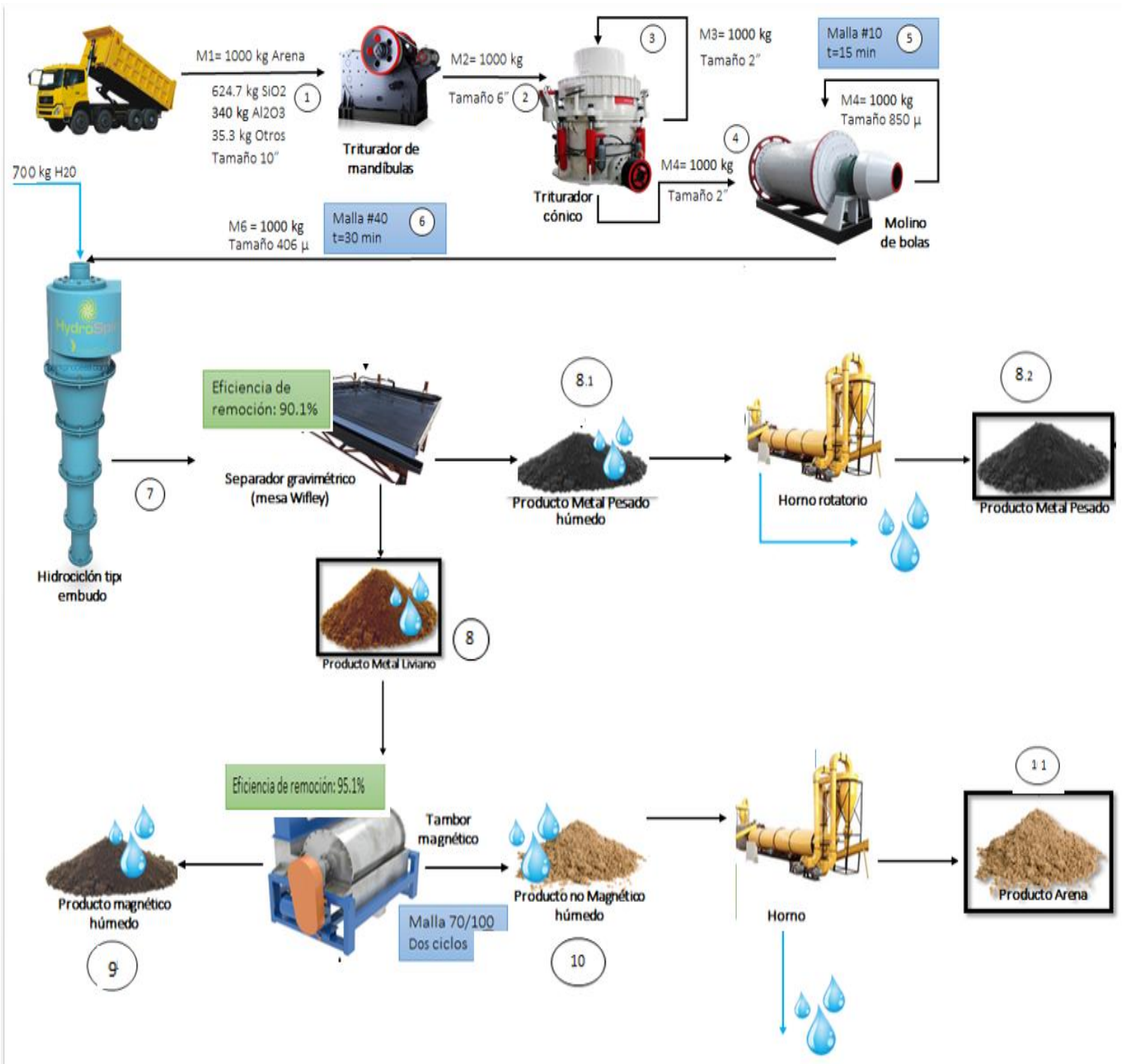
### Anexo A. Selección de granos estudiados en el análisis visual



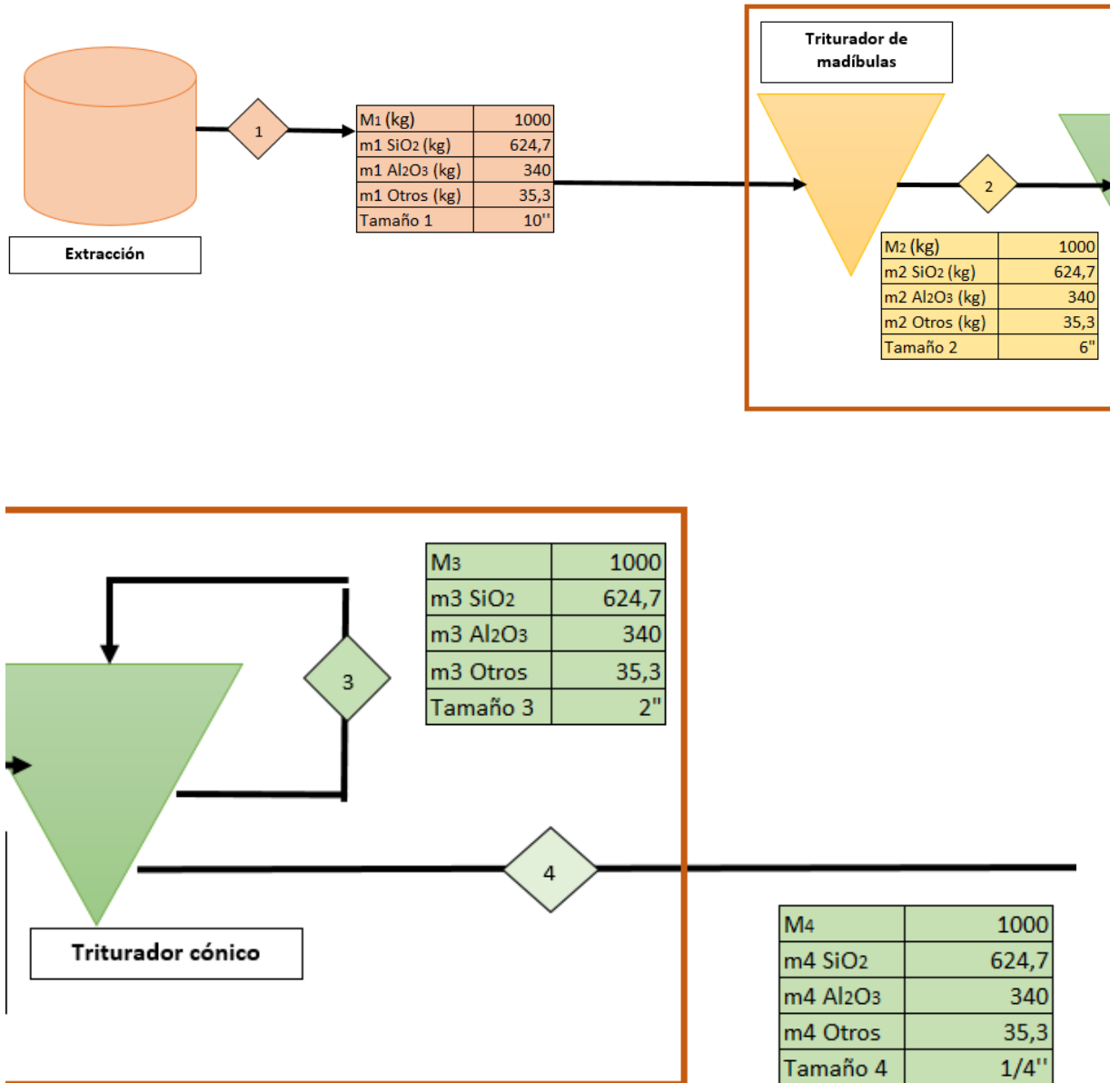
### Anexo B. Resultados obtenidos en el análisis de fluorescencia de rayos x

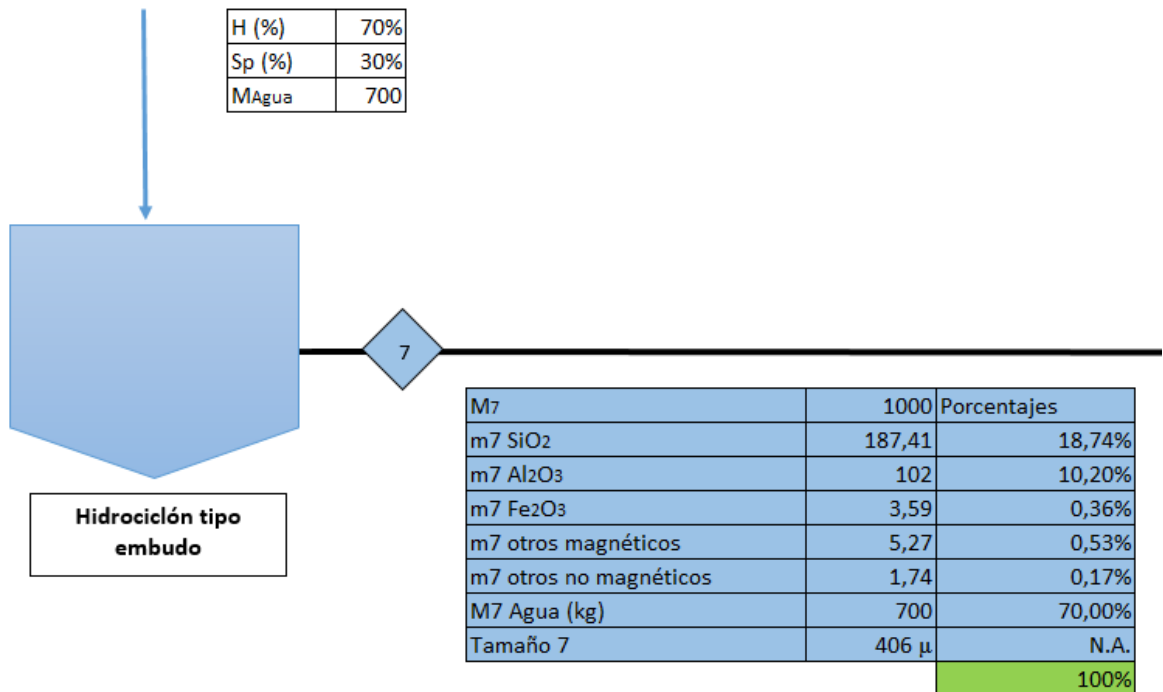
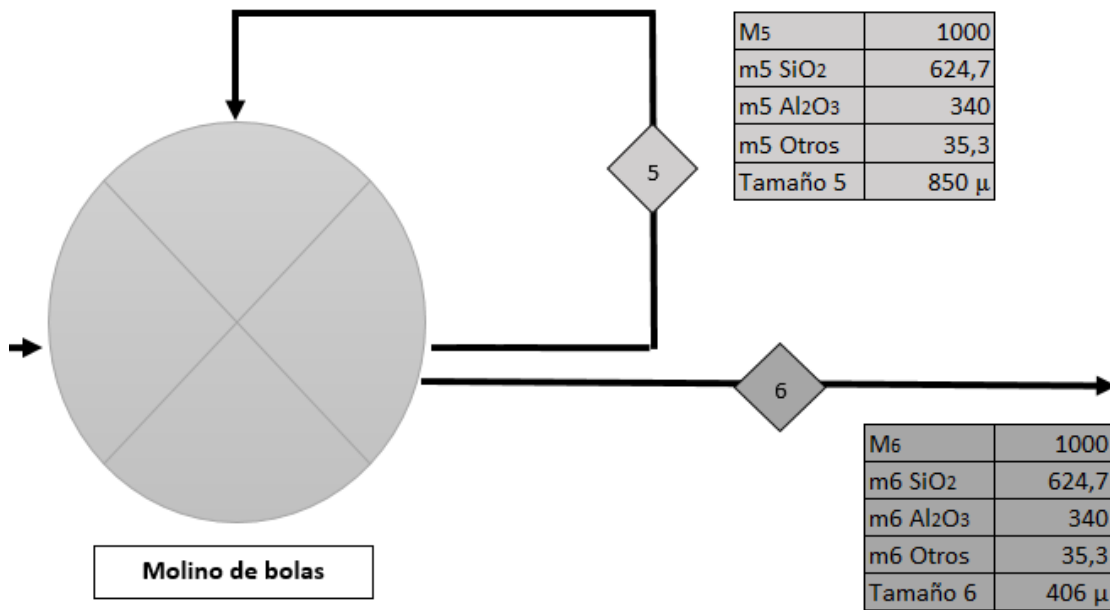
Layer Info	Analyte	Result	(Std. Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Intensity
Group : MINERALES-5u_aire						
Sample : arena_2						
1	Layer1					
1	Layer	5.000 um	(-----)	Fix	-----	-----
1	Elem. C3H6	100.000 %	(-----)	Fix	-----	-----
-----						
B	Base					
2	Elem. SiO2	62.465 %	( 0.397)	Quant.-FP	SiKa	1.163
2	Elem. Al2O3	34.002 %	( 0.928)	Quant.-FP	AlKa	0.081
2	Elem. CaO	1.453 %	( 0.005)	Quant.-FP	CaKa	3.950
2	Elem. Fe2O3	1.196 %	( 0.003)	Quant.-FP	FeKa	99.200
2	Elem. K2O	0.600 %	( 0.004)	Quant.-FP	K Ka	1.059
2	Elem. TiO2	0.152 %	( 0.003)	Quant.-FP	TiKa	2.532
2	Elem. SO3	0.054 %	( 0.007)	Quant.-FP	S Ka	0.013
2	Elem. MnO	0.025 %	( 0.001)	Quant.-FP	MnKa	1.613
2	Elem. ZnO	0.014 %	( 0.000)	Quant.-FP	ZnKa	3.761
2	Elem. Sc2O3	0.014 %	( 0.001)	Quant.-FP	ScKa	0.065
2	Elem. SrO	0.010 %	( 0.000)	Quant.-FP	SrKa	9.206
2	Elem. V2O5	0.009 %	( 0.001)	Quant.-FP	V Ka	0.212
2	Elem. ZrO2	0.002 %	( 0.000)	Quant.-FP	ZrKa	2.138
2	Elem. CuO	0.002 %	( 0.000)	Quant.-FP	CuKa	0.321
2	Elem. Rb2O	0.001 %	( 0.000)	Quant.-FP	RbKa	0.535
2	Elem. NiO	0.001 %	( 0.000)	Quant.-FP	NiKa	0.084
2	Elem. Y2O3	0.001 %	( 0.000)	Quant.-FP	Y Ka	0.496

### Anexo C. Diagrama de flujo de balance de materia general

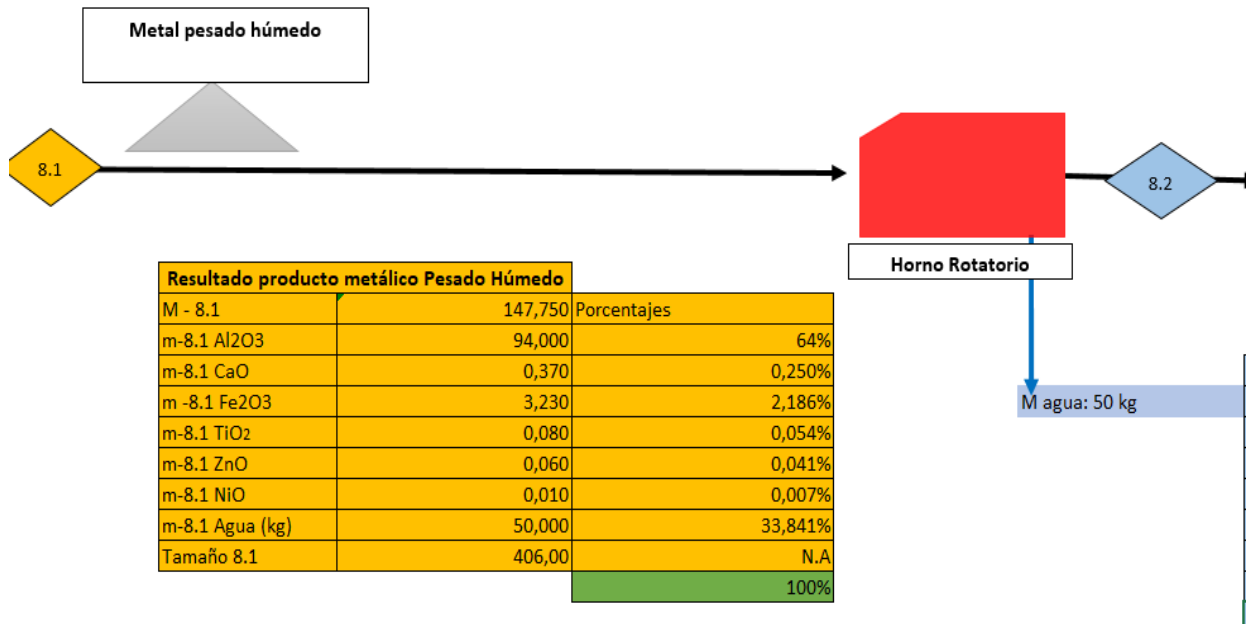
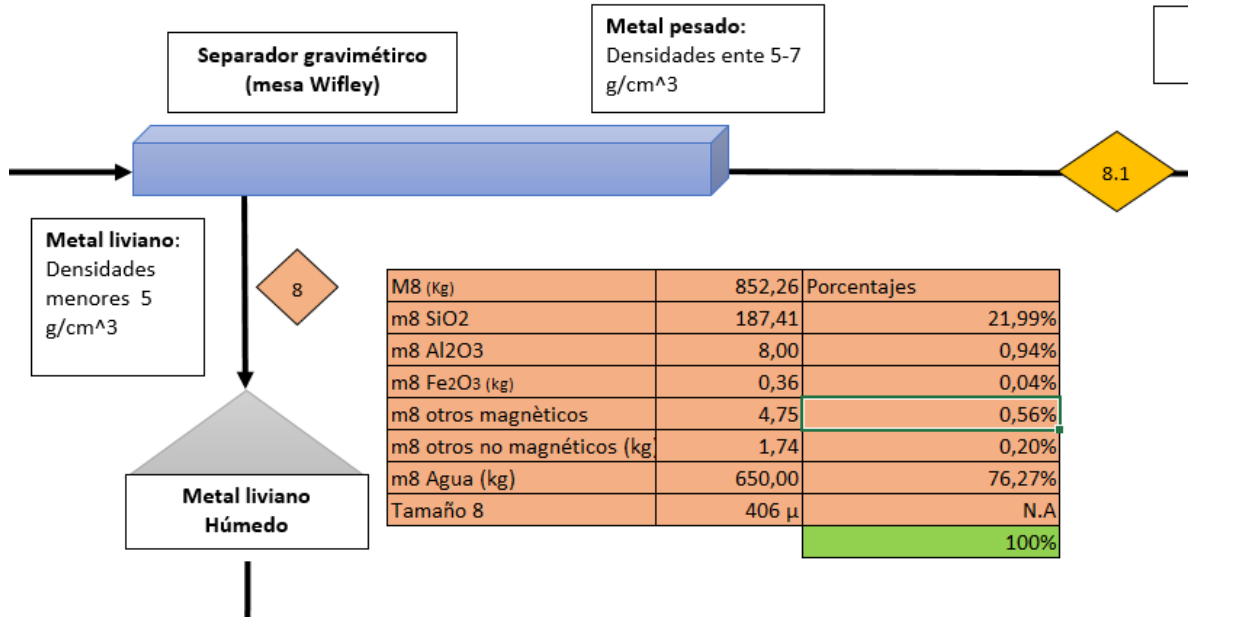


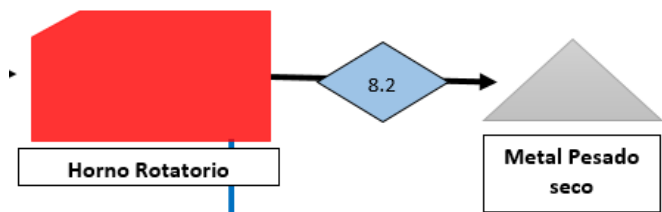
**Anexo D. Diagrama de Balance de materia por etapas con cálculos**



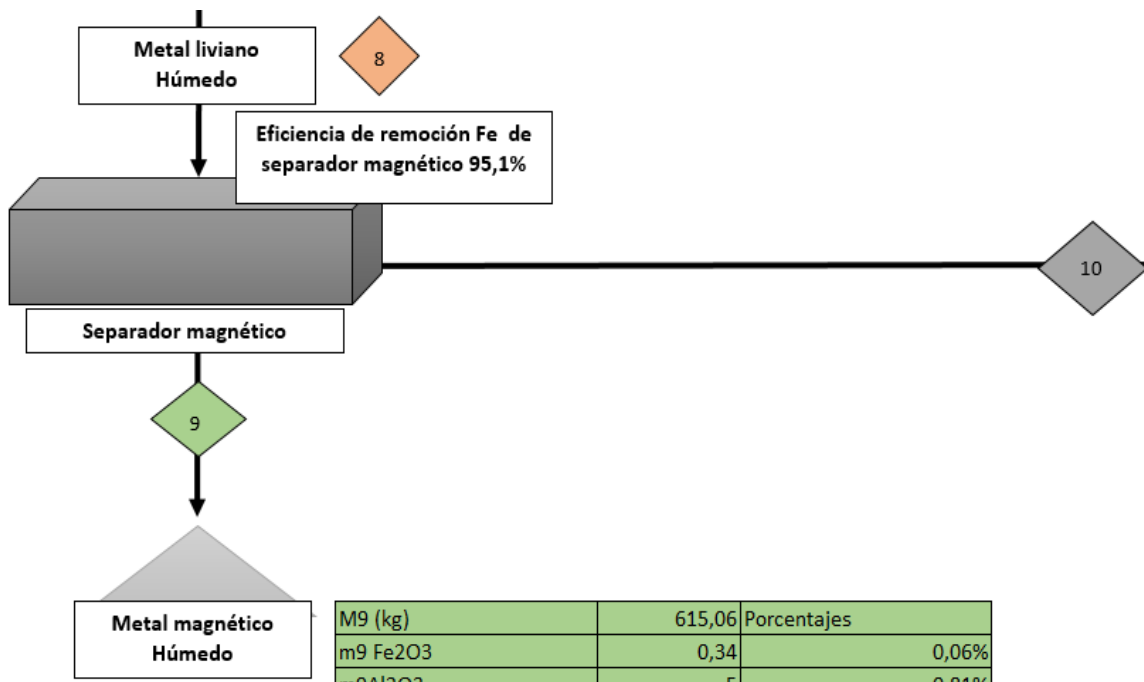


Eficiencia de remoción Fe de mesa Wifley (%)	90,1%
Remanente (%)	9,90%





Resultado producto metálico Pesado Seco		
M - 8.2	97,750	Porcentajes
m8.2 Al2O3	94,000	96%
m-8.2 CaO	0,370	0,379%
m -8.2 Fe2O3	3,230	3,304%
m-8.2 TiO2	0,080	0,082%
m-8.2 ZnO	0,060	0,061%
m-8.2 NiO	0,010	0,010%
m-8.2 Agua (kg)	0,000	0,000%
Tamaño 8.2	406,00	N.A
		100%



M9 (kg)	615,06	Porcentajes
m9 Fe2O3	0,34	0,06%
m9Al2O3	5	0,81%
m9 otros magnéticos	4,52	0,73%
m9 Agua	605,2	98,40%
Tamaño 9	406 μ	100%

