

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERAL CALCÁREO
PERTENECIENTE AL DISTRITO MINERO “LOS SANTOS” A NIVEL DE
LABORATORIO**

**EDWING GUERRERO RODRÍGUEZ
JULIAN MAURICIO VESGA SALAMANCA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2012**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERAL CALCÁREO
PERTENECIENTE AL DISTRITO MINERO “LOS SANTOS” A NIVEL DE
LABORATORIO**

**EDWING GUERRERO RODRÍGUEZ
JULIAN MAURICIO VESGA SALAMANCA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:
M.Sc WALTER PARDAVÉ LIVIA**

**Codirector:
M.Sc LUIS ORLANDO AGUIRRE**

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

2012

Primero a Dios, a mis padres y principalmente a mi pequeño hijo Pipe que es un motivo para lograr todas mis metas con esfuerzo y dedicación.

Edwing GR.

A cada una de las personas que contribuyeron a construir parte de lo que soy, principalmente mis padres a quienes con agradecimiento sincero plasmo en estas letras los años de esfuerzo, que me han forjado como un ser humano digno de ser colombiano.

Julian Mauricio

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes personas y entidades:

- ✚ M.Sc Walter Pardavé Livia y M.Sc Luis Orlando Aguirre, Directores del proyecto, por su apoyo, paciencia, dedicación y contribución.
- ✚ PhD. Custodio Vásquez Quintero, por su incondicional apoyo y asesoría durante el desarrollo del proyecto.
- ✚ Vicerrectoría de Investigación y Extensión de La Universidad Industrial de Santander, por la financiación del presente Trabajo de Grado, a través del proyecto: MEJORAMIENTO DEL PROCESO ARTESANAL DE BENEFICIO DE MINERALES CALCÁREOS EN SANTANDER, Código: 5453.
- ✚ Empresas de procesamiento de minerales calcáreos del distrito minero Los Santos por su colaboración.
- ✚ Técnicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica: Ambrosio Carrillo, Javier, y Mario, por su colaboración durante el desarrollo del proyecto.
- ✚ Profesor Antonio Henao, director del Laboratorio de Difracción de Rayos-X de la Escuela de Química.
- ✚ Laboratorio de Microscopia en el Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG) de la Universidad Industrial de Santander.
- ✚ A todas aquellas personas que de alguna u otra forma nos brindaron su ayuda para culminar este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	19
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. MARCO TEÓRICO.	23
3.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	23
3.2 LA PIEDRA CALIZA.....	25
4. METODOLOGÍA	32
4.1 ETAPA 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	32
4.2 ETAPA 2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y DIAGNÓSTICO DE LAS PLANTAS INDUSTRIALES.....	32
4.3 ETAPA 3. CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.	33
4.3.1 Análisis cuantitativo de difracción de rayos x (DRX)	33
4.3.2 Determinación del porcentaje de CaO y pérdidas por ignición	33
4.3.3 Análisis granulométrico por tamizaje	33
4.4 ETAPA 4. PRUEBAS PRELIMINARES Y ASIGNACIÓN DE VALORES A LAS VARIABLES OPERATIVAS.	34
4.5 ETAPA 5. DESAROLLO EXPERIMENTAL.....	34
4.6 ETAPA 6: PROPUESTA DE UN FLUJOGRAMA PARA EL PROCESAMIENTO DE MINERALES CALCÁREOS.	36
5. RESULTADOS.....	37
5.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE MINERAL CALCÁREO Y DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS.	37
5.1.1 Descripción del yacimiento	37
5.1.2 Recolección de las muestras	38
5.1.3 Producción	39
5.1.4 Recurso humano.....	41

5.1.5 Seguridad industrial	41
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.....	42
5.2.1 Difracción de Rayos X.....	42
5.2.2 Pérdidas por Ignición	46
5.2.3 Determinación del porcentaje de CaO	47
5.2.4 Determinación de la distribución granulométrica del mineral	47
5.3 PRUEBAS PREELIMINARES.....	53
5.4 MOLIENDA	57
5.5 CALCINACIÓN	67
5.5.1 análisis de morfología usando SEM y EDS.....	72
5.5.2 Análisis de CaO para los minerales calcinados	77
5.6 PROPUESTA DE UN FLUJOGRAMA PARA EL BENEFICIO DE MINERALES CALCÁREOS EN EL DISTRITO MINERO LOS SANTOS.	78
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXOS.....	85

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de calizas según el contenido de Carbonato de Calcio	27
Tabla 2. Cuantitativo de las especies cristalinas del mineral perteneciente al municipio de Curití	43
Tabla 3. Cuantitativo de las especies cristalinas del mineral perteneciente al municipio de Los Santos	44
Tabla 4. Cuantitativo de las especies cristalinas del mineral perteneciente al municipio de Zapatoca	45
Tabla 5. Resultados pérdidas por ignición	46
Tabla 6. Porcentajes de CaO total en las diferentes muestras de mineral.	47
Tabla 7. Funciones de distribución de tamaños Rosin-Rammler y Gaudin-Schuman para cada mineral	52
Tabla 8. Porcentaje y peso de los diferentes tamaños de bolas usados en la prueba preliminar del tiempo de molienda	54
Tabla 9. Resultados molienda preliminar - Mineral: los Santos	55
Tabla 10. Resultados molienda preliminar - Mineral: Curití.	56
Tabla 11. Resultados molienda preliminar – Mineral: Zapatoca	56
Tabla 12. Distribución de las variables usadas en las pruebas experimentales.....	58
Tabla 13. Porcentaje carga de bolas. Fuente: Autores.	58
Tabla 14. Resultados de las pruebas experimentales para las tres muestras de mineral calcáreo	59
Tabla 15. Valores óptimos de las variables para el máximo porcentaje pasante	67
Tabla 16. Muestras seleccionadas para la realización de SEM	72
Tabla 17. Porcentaje de CaO total en las diferentes muestras de mineral antes y después del proceso de calcinación.....	77

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama, causa y efecto del problema planteado	21
Figura 2. Presión de descomposición (logarítmica) de varios carbonatos e hidratos en función del inverso de la temperatura.	30
Figura 3. Ilustración de los procesos involucrados en la disociación de la piedra caliza.....	31
Figura 4. Mapa de los municipios que conforman el distrito minero Los Santos ...	37
Figura 5. Yacimiento del mineral calcáreo en el municipio Los Santos	38
Figura 6. Diagrama del procesamiento de minerales calcáreos en el distrito minero Los Santos.....	39
Figuras 7 y 8. Molino de martillos y clasificador vertical ubicados en unas de las plantas industriales del municipio de Curití	40
Figura 9. Parte superior del horno utilizado para calcinación ubicado en una planta industrial del municipio de Curití.	40
Figura 10. Difractograma del mineral perteneciente al municipio de Curití.....	43
Figura 11. Difractograma del mineral perteneciente al municipio de Los Santos.....	44
Figura 12. Difractograma del mineral perteneciente al municipio de Zapatoca	45
Figura 13. Grafica porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: Curití.	48
Figura 14. Grafica de la Relación entre el porcentaje en peso pasante y retenido Vs Abertura del tamiz – Mineral: Curití	48
Figura 15. Grafica Porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: los Santos.....	49
Figura 16. Grafica de la Relación entre el porcentaje en peso pasante y retenido Vs Abertura del tamiz – Mineral: Los Santos	49
Figura 17. Grafica Porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: Zapatoca.....	50

Figura 18. Grafica de la Relación entre el porcentaje en peso pasante y retenido Vs Abertura del tamiz – Mineral: Zapatoca	50
Figura 19. Grafica Porcentaje peso acumulado pasante malla 100 Vs tiempo en minutos - Mineral: los Santos.	55
Figura 20. Gráfica Porcentaje peso acumulado pasante malla 100 Vs tiempo en minutos - Mineral.....	56
Figura 21. Gráfica Porcentaje peso acumulado pasante malla 100 Vs tiempo en minutos – Mineral: Zapatoca.....	57
Figuras 22 y 23 Diagrama de Pareto Estandarizado para % Pasante malla 100. Mineral y Diagrama Efectos principales Mineral: Los Santos	59
Figuras 24y 25. Diagrama de Pareto Estandarizado para % Pasante malla 100 y Diagrama Efectos principales Mineral: Curití.	60
Figuras 26 y 27. Diagrama de Pareto Estandarizado para % Pasante malla 100 y Diagrama Efectos principales. Mineral: Zapatoca.	60
Figura 28. Diagrama Interacción Tiempo y Carga de bolas. Mineral: Los Santos.....	62
Figura 29. Diagrama Interacción entre Tiempo y Carga de bolas. Mineral: Curití.	62
Figura 30. Diagrama Interacción Tiempo y Carga de bolas. Mineral: Zapatoca.....	62
Figura 31. Diagrama de Pareto después de eliminar efectos. Mineral: Los Santos.....	63
Figura 32. Diagrama de Pareto después de eliminar efectos. Mineral: Curití.	64
Figura 33. Diagrama de Pareto después de eliminar efectos. Mineral: Zapatoca.....	64
Figura 34. Diagrama de Superficie de respuesta con contornos abajo. Los Santos.....	65
Figura 35. Diagrama de Superficie de respuesta con contornos abajo. Curití.	65

Figura 36. Diagrama de Superficie de respuesta con contornos abajo. Zapatoca.....	66
Figura 37. Verificación del porcentaje de pérdida en peso en función del tiempo. Mineral: Curití.....	70
Figura 38. Variación del porcentaje de pérdida en peso en función del tiempo: Los Santos.....	71
Figura 39. Imágenes SEM a 800X correspondiente al mineral de Curití, calcinado a 1100°C durante 20 minutos (a) con SE (electrones secundarios) y (b) con BSE (electrones retrodispersos).	72
Figura 40. Imágenes SEM a 800X correspondiente al mineral Los Santos, calcinado a 1100°C durante 20 minutos (a) con SE y (b) con BSE.	73
Figura 41. Imágenes SEM a 800X correspondientes al mineral de Curití, calcinado a 1000°C durante 50 minutos (a) con SE y (b) con BSE	73
Figura 42. Imágenes SEM a 6000X del mineral (a) Curití calcinado durante 20 minutos a 1100°C, (b) Los Santos calcinado durante 20 minutos a 1100°C y (c) Curití calcinado durante 50 minutos a 1000°C.....	74
Figura 43. Imagen SEM 1500X con espectrograma del punto de análisis para el mineral de Curití calcinado durante 20 minutos a 1100°C. Fuente: Autores.....	75
Figura 44. Imagen SEM 800X con espectrograma del punto de análisis del mineral de Curití calcinado durante 50 min a 1000°C.....	76
Figura 45. Imagen SEM 800X con espectrograma del punto de análisis para el mineral de Los Santos calcinado durante 20 minutos a 1100°C	76
Figura 46. Imagen SEM 800X con espectrograma del punto de análisis del mineral Los Santos calcinado durante 20 minutos a 1100°C.....	76
Figura 47. Flujograma propuesto para el beneficio de minerales calcáreos en el distrito minero de.....	79

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Distribución de tamaño para cada muestra de mineral previo al proceso de molienda.....	85
Anexo B. Distribución de tamaños del mineral posterior al proceso de molienda	88
Anexo C. Micrografías A 6000 Y 15000 Aumentos Del Mineral Calcinado Proveniente Del Municipio De Curití	90

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERAL CALCÁREO, PERTENECIENTE AL DISTRITO MINERO “LOS SANTOS” A NIVEL DE LABORATORIO*

AUTORES: VESGA SALAMANCA, Julian Mauricio; GUERRERO RODRÍGUEZ, Edwing**

PALABRAS CLAVES: Mineral, Caliza, Molienda, Calcinación.

DESCRIPCIÓN:

El procesamiento de minerales calcáreos (calizas) en el distrito minero Los Santos (DM-24) es una de las principales fuentes económicas de la región, en la cual los procesos son llevados a cabo de una forma empírica y sin una caracterización previa del mineral. En el presente proyecto se desarrolló una metodología en la cual se tomaron muestras en los municipios de los extremos que conforman el distrito minero Los Santos (Curití, Los Santos y Zapatoca), las cuales fueron trituradas y caracterizadas mediante un análisis cuantitativo de difracción de rayos x (DRX), Pérdidas por ignición (LOI), distribución granulométrica y análisis gravimétrico para determinar el contenido total de óxido de calcio (CaO) en cada muestra.

En el proceso de molienda las variables más significativas obtenidas a partir de un paquete estadístico, en forma descendente fueron el tiempo de retención en el molino, seguido de el tamaño de alimento y la fracción de carga de bolas; donde los valores de estas variables con los mejores resultados obtenidos para los tres minerales del distrito fueron 10 minutos de retención en el molino, tamaño de alimento menor a la malla 4m y fracción de bolas igual a 17%.

Los resultados obtenidos mostraron una calcinación efectiva para tamaños de partícula de $\frac{1}{4}$ " a una temperatura de 1100°C con tiempos de retención en el horno en un rango de 10 a 20 minutos para los minerales de Curití y Los Santos, mientras que el mineral de Zapatoca no es recomendable llevar a un proceso de calcinación igual al de una caliza debido a su alto contenido de yeso y anhídrido además de un bajo contenido de CaCO_3 evidenciado en el análisis cuantitativo DRX.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Director: M.Sc Walter Pardavé Livia. Codirector: M.Sc Luis Orlando Aguirre.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF PROCESS BENEFIT OF MINERAL CALCAREOUS, PERTAINING TO MINING DISTRICT "LOS SANTOS" TO LEVEL LABORATORY.*

AUTHORS: VESGA SALAMANCA, Julian Mauricio; GUERRERO RODRÍGUEZ, Edwing.**

KEYWORDS: Ore, Limestone, grinding, roasting, Statgraphics.

DESCRIPTION:

Minerals processing limestone (limestone) in the mining district Los Santos (DM-24) is one of the main economic sources of the region, in which the processes are carried out in an empirical way and without a previous characterization of the mineral. In this project we developed a methodology in which samples were taken at the end municipalities that make up the mining district Los Santos (Curití, Los Santos and Zapatoca), which were ground and characterized by quantitative analysis ray diffraction x (XRD) Loss on ignition (LOI), particle size distribution and gravimetric analysis to determine the total content of calcium oxide (CaO) in each sample.

In the grinding process the most significant variables obtained from a statistical package, in descending were retention time in the mill followed by the feed size and the fraction of load balls, where the values of these variables with the best results obtained for the three mineral district retention were 10 minutes in the mill feed size of less than 4mm mesh fraction balls and equal to 17%.

The results showed an effective calcination particle sizes ¼" at a temperature of 1100 °C with holding times in the oven at a range of 10 to 20 minutes Curití minerals and Los Santos, while ore Zapatoca advisable not lead to a process of calcining the same limestone due to its high content of gypsum and anhydrite and a low content of CaCO₃ shown in quantitative XRD analysis.

* Project of Degree.

** Faculty Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Material Science.
Director: M.Sc Walter Pardavé Livia. Codirector: M.Sc Luis Orlando Aguirre.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de obtención de la cal viva como el de cualquier mineral, requiere de un proceso industrial el cual depende de diferentes variables las cuales deben ser identificadas por el productor; el no conocerlas, ni identificarlas puede representar pérdidas a nivel económico hasta disminuir la calidad del producto frente a otras productoras del mismo, para este caso la caliza procesada en el distrito minero de Los Santos (Santander).

Entre los procesos de los cuales es indispensable conocer las variables para obtener cal con las mejores características, se encuentran las etapas de conminución y calcinación del mineral calcáreo.

La conminución es el proceso a través del cual se produce una reducción de tamaño de las partículas de mineral, mediante trituración y/o molienda; para éste último es importante tener en cuenta el porcentaje de bolas y el tiempo de retención en el molino, con el fin de obtener un material de tamaño apropiado para un posterior proceso de calcinación, en el cual, variables elementales como el tamaño de partícula (el cual es determinado de acuerdo al tipo de horno utilizado), la temperatura y tiempo de retención en el horno, son indispensables para un adecuado procesamiento de la cal. Estas son las variables evaluadas en la presente investigación, con la finalidad de obtener parámetros con los cuales es recomendable procesar la piedra caliza proveniente del distrito minero Los Santos (Santander).

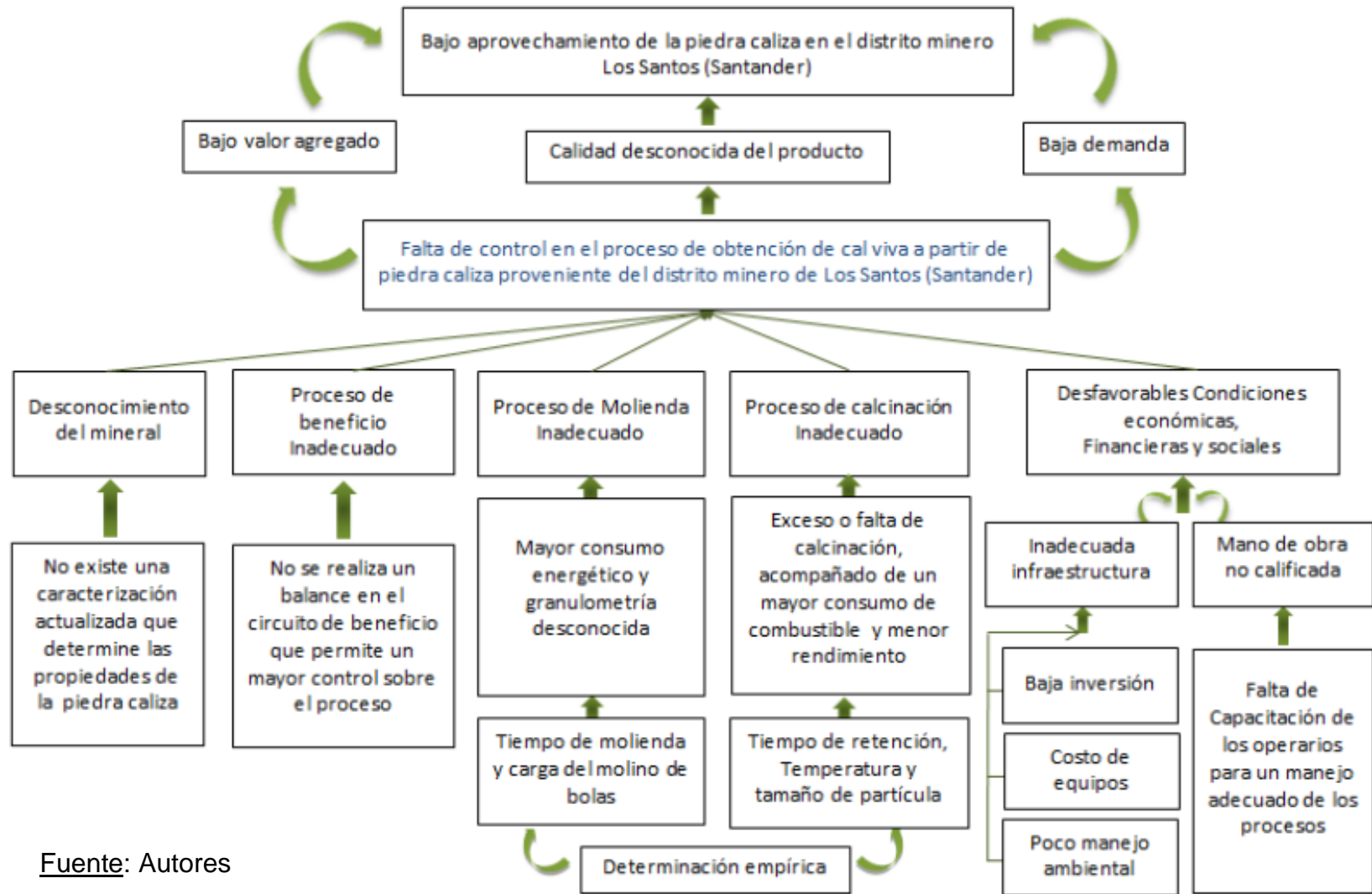
Es importante conocer de antemano la temperatura real de calcinación del carbonato de calcio, la cual depende de las propiedades del mineral; aunque industrialmente es recomendable trabajar sobre esta temperatura debido a la relación de tamaño y el tiempo de permanencia (específico para cada tamaño); utilizar temperaturas de calcinación muy elevadas, puede producir un

encogimiento y reducción del volumen de la cal, además de una posible recarbonatación en la superficie de la roca que produce cal no apropiada para hidratación. Por tal razón esta temperatura se debe determinar experimentalmente para diferentes tamaños de partícula.

El tiempo que va a estar expuesto el mineral en el horno está relacionado con el tamaño; ya que este es el tiempo necesario para que el calor difunda al interior de la piedra caliza; entre menor sea su tamaño más rápido se producirá la calcinación. Para tiempos muy cortos de retención, puede ocurrir que en el centro de la caliza se presente carbonato de calcio al finalizar el proceso de calcinación; mientras que para tiempos de exposición elevados, la superficie puede encogerse y cerrar los poros necesarios para el escape de dióxido de carbono, lo cual produce una superficie impermeable que da lugar a la llamada “cal quemada” que no posee importancia comercial. De igual modo, un incremento en el tiempo de retención resulta en la disminución de la producción además de un mayor consumo de combustible, por lo cual disminuye la rentabilidad del proceso; por esto es importante determinar el tiempo adecuado de retención para un tamaño y temperatura de calcinación establecido. En la figura 1 se presenta un resumen de la problemática presentada, de igual modo este proyecto de investigación busca primordialmente determinar las variables más significativas durante el proceso de obtención de la cal viva procedente del distrito minero Los Santos; para el cual se realizó caracterización de los diferentes minerales, pruebas preliminares, balance en el proceso de trituración y molienda, como a su vez pruebas gravimétricas.

Mediante el proceso llevado cabo se logró obtener una cal con aproximadamente 96 y 72% de óxido de calcio libre para los minerales de Curití y Los Santos respectivamente. El mineral proveniente del municipio de Zapatoca presentó en su composición principal yeso y anhidrita el cual requiere de un procesamiento diferente.

Figura 1. Diagrama, causa y efecto del problema planteado



Fuente: Autores

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar las principales condiciones operativas de los procesos de molienda y calcinación de mineral calcáreo proveniente del distrito minero Los Santos a nivel de laboratorio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar el tiempo y carga de bolas adecuado, durante el proceso de molienda en seco de mineral calcáreo.
- Para diferentes tamaños de partícula determinar la temperatura y tiempo apropiado para obtener el mayor rendimiento durante el proceso de calcinación de mineral calcáreo.
- Proponer un Flujograma con balance de masa del proceso de beneficio de mineral calcáreo proveniente del distrito minero Los Santos, a nivel de laboratorio.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Desde la prehistoria, el uso de la cal y la piedra caliza se ha registrado en el apagado de incendios. En la cultura egipcia se evidencia el uso de la caliza para la fabricación de las pirámides de Giza. Alrededor del año 1.000 A.C., los griegos, egipcios, romanos, incas, mayas, chinos e indios Moguhay utilizaron la cal viva e hidratada, para la construcción. [2]

Cato 184 A.C. mencionó por primera vez la producción de cal en hornos. Pliny en sus "capítulos sobre temas químicos", describió la producción, apagado, usos de la cal, y destacó la importancia de su pureza química. Alrededor del año 1700 Joseph Black dio la primera explicación de la técnica apropiada para la calcinación de la piedra caliza y la evolución del dióxido de carbono durante el proceso. Lavoisier afirmó y explicó lo expuesto por Black en un relato llamado "El arte de la Calcinación", en donde se describen los aspectos de diseño, operación, y economía de la explotación de canteras de piedra caliza y la calcinación de la cal. [2]

En 1867, Debray llevó a cabo las primeras mediciones de la presión de disociación del carbonato de calcio, pero hasta 1886 Le Chatelier desarrolló las mediciones exactas. En 1935 Searle describió unos 40 diseños de horno de cal, pero actualmente un número limitado continúa siendo comercialmente viable. [2]

Debido a que la composición química de una caliza varía considerablemente entre las diferentes regiones y también entre los yacimientos de este mineral en una misma región [1], numerosos estudios se han realizado en diferentes partes del mundo con el fin de obtener el mayor rendimiento durante el proceso de beneficio de la caliza. Wheeler [10] en su estudio titulado "análisis de calizas y dolomitas por

espectroscopia de fluorescencia de rayos X” propone esta técnica como un método ágil y preciso para determinar compuestos nocivos como el monóxido de sodio, magnesio, potasio y pentóxido de fósforo presentes en calizas y dolomitas de diversas zonas geológicas en los estados de Michigan y Pensilvania (E.E.U.U.); dichos óxidos son críticos de acuerdo a la aplicación del producto, como en la producción de acetileno a partir de carburo de calcio (obtenido de la cal viva), en donde cantidades apreciables de pentóxido de fósforo pueden causar explosiones.

Zhongxiang Chen, John R. Grace y C. Jim Lim [6], desarrollaron un modelo para predecir la evolución de la distribución de tamaño de partícula y el desgaste de la caliza sometida a impacto, con temperaturas que varían desde 25 hasta 580°C y 1 atmósfera de presión en un lecho fluidizado, encontrando un menor desgaste producido a mayores temperaturas debido a una disminución en la velocidad de partícula. El diámetro medio de las partículas de piedra caliza, disminuyó con el aumento de la velocidad y del número de impactos. A partir de los resultados fue posible establecer dos ecuaciones empíricas mediante un mecanismo de impacto en el cual el área de la nueva superficie generada es proporcional a la energía cinética total consumida, con el número de ciclos de impacto y una disminución exponencial de la temperatura.

Otro destacado estudio en la fragmentación y desgaste de caliza en un lecho fluidizado, fue realizado por Xuan Yao, Hai Zhang, Hairui Yang, Qing Liu, Jinwei Wang, Guangxi Yue [7], quienes estimaron que el tamaño promedio de las partículas disminuye de 10 al 20% durante el proceso de fragmentación, el cual depende del tipo de piedra caliza, la tasa de calentamiento, el estado de calcinación y la concentración de CO₂ del ambiente en el cual ocurre la fragmentación. Los resultados experimentales indicaron que el mecanismo de fragmentación de la piedra caliza está determinado por la liberación de CO₂ en lugar de los esfuerzos térmicos.

En cuanto a la calcinación de la caliza İrfan Ar y Gülşen Doğu [8], realizaron un estudio a partir de un análisis termogravimétrico TGA para 10 diferentes muestras de caliza procedente de la región de Turquía. Los resultados obtenidos en su estudio indican que el peso de la muestra no tiene un efecto significativo sobre la velocidad de reacción en la calcinación en un rango de 40 a 65 [mg] y dado que el modelo de núcleo sin reaccionar se ajusta perfectamente a los datos experimentales, este controla la reacción de calcinación de la piedra caliza. El intervalo de energía de activación para diferentes tamaños de partícula a partir de este modelo, presenta valores de 40 – 50 Kcal/mol. La porosidad presenta valores dentro de una amplia gama ($\epsilon = 0,32$ a $0,51$), dependiendo de la procedencia o el origen de la piedra caliza utilizada.

Un novedoso estudio desarrollado por N. Kantiranis, A. Filippidis, A. Tsirambides, B. Christaras [9], en el que una piedra caliza alta en calcio proveniente de la región de Agios Panteleimonas en Florina (Noroeste de Grecia) fue calcinada para determinar el avance de la descomposición mediante ondas P. El estudio arrojó que para la muestra de estudio, la calcinación inicia alrededor de 750°C y termina dependiendo del tamaño de partícula entre 1000 y 1150°C. La velocidad de dichas ondas para especímenes cúbicos de 4, 6 y 8 cm de lado, disminuye debido a un aumento de temperatura entre 650 y 1150 °C; pero para tamaños de 1 y 2 cm de lado hay un aumento considerable de la velocidad de onda para temperaturas mayores 1050°C, posiblemente asociado a la contracción y/o reducción de las partículas.

3.2 LA PIEDRA CALIZA

Según Oates J. [2], la piedra caliza es un mineral que se encuentra en la naturaleza y que existe prácticamente en todo el mundo; su composición química varía considerablemente entre los yacimientos de diferentes regiones y también

entre yacimientos en una misma región, por lo tanto, el producto final para cada depósito de un yacimiento natural será diferente. [1]

A menudo los términos de cal y piedra caliza tienden a ser confundidos. La piedra caliza es en general un término que abarca las rocas sedimentarias o fósiles que se componen mayoritariamente de calcita (CaCO_3) u ocasionalmente por aragonita, la cual posee la misma composición química que la calcita pero diferente estructura cristalina. [3] Por el contrario la cal es un derivado de la piedra caliza, es su forma calcinada conocida popularmente como "cal viva". [2]

El proceso de formación de las rocas calizas según Higuera P. [3], está asociado a un proceso de sedimentación directa, comúnmente por precipitación bioquímica en donde el carbonato cálcico se fija (en general en forma de aragonito) en las conchas o esqueletos de determinados organismos y a su muerte, estas conchas o esqueletos se acumulan originando un sedimento carbonatado. El aragonito es inestable en condiciones atmosféricas por lo que se va transformando en calcita y la disolución parcial y reprecipitación del carbonato cementa la roca, dando origen a las calizas. Otra forma de depósito es la fijación del carbonato sobre elementos extraños, como granos de cuarzo, o pequeños fragmentos de fósiles, dando origen a los oolitos (calizas oolíticas). También las algas fijan este compuesto, dando origen a mallas de algas o estromatolitos, que si se fragmentan y ruedan originan los pisolitos (calizas pisolíticas). Todas estas posibilidades dan origen a los diversos tipos de calizas.

Hay una gran diversidad de forma y tipos de piedra caliza, que varían en color, composición química, mineralogía, cristalinidad, textura y dureza. Por lo general un depósito de mineral calcáreo está contaminado con cantidades variables de impurezas, como arcilla, sílice, minerales orgánicos y óxidos de hierro que a través del tiempo se convierten en una parte íntima de la piedra. La contaminación de la piedra con el suelo por lo general se produce en el inicio de la deposición, pero en

algunos casos las impurezas se absorben a través de los poros e intersticios durante la deposición. [2] Según el Instituto geológico británico BGS [4], el contenido de impurezas varía considerablemente en tipo y cantidad, pero son importantes desde el punto de vista económico sólo si afectan la utilidad de la roca.

Las rocas carbonatadas rara vez se encuentran en la naturaleza de forma monomineral, por lo tanto una clasificación mineralógica de esas rocas necesita tomar en cuenta la variación en cantidad de calcita, dolomita y materiales no carbonosos, aunque la determinación del contenido de carbonato puede ser utilizado para clasificar el grado químico de las calizas. [4]

Tabla 1. Clasificación de calizas según el contenido de Carbonato de Calcio (CaCO_3). [4]

Categoría	Porcentaje CaCO_3
Muy alta pureza	> 98,5
Alta pureza	97,0 - 98,5
Media pureza	93,5 - 97,0
Baja pureza	85,0 - 93,5
Impura	< 85,0

Según Oates J. [2], los requisitos que se deben tener en cuenta al evaluar la calidad de un depósito de piedra caliza son:

- a) La fuerza y resistencia a la abrasión de la piedra caliza.
- b) La resistencia a la degradación térmica de la piedra caliza.
- c) La fuerza y la resistencia a la abrasión de la cal viva.
- d) La Tasa de calcinación.
- e) La reactividad de producto.
- f) El contenido de CaCO_3 , MgCO_3 .

g) El contenido de impurezas que podrían afectar el funcionamiento del horno.

La caliza tiene gran interés económico ya que constituye la materia prima del cemento; se utiliza parte en la construcción, como fundente en la industria siderúrgica, en la industria química, en la manufactura de vidrio, como carga, y otros usos específicos. [5] Al calor (calcinación) la caliza forma cal (CaO) que es un óxido básico que puede ser utilizado para reaccionar con óxidos ácidos (como ocurre en el proceso de fundición). La cal hidratada se forma por reacción de cal con agua (producto alcalino) que puede ser usado para neutralizar soluciones ácidas. [4]

3.3 CALCINACIÓN DE LA CALIZA.

La calcinación es un proceso que tiene por objeto remover CO₂ y otros gases que se encuentran químicamente unidos al mineral, además del agua libre, el agua débilmente unida y el agua química o fuertemente unida; este proceso involucra un cambio en la naturaleza química del mineral. [13]

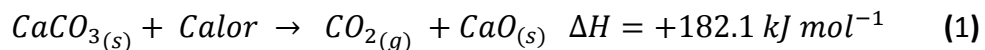
El término "calcinación de piedra caliza" se refiere al proceso de su descomposición térmica en cal y dióxido de carbono. Las reacciones químicas que intervienen en la descomposición de la piedra caliza son engañosamente simples. Hay, sin embargo, complicaciones, en particular con la dolomita, que se cree es causada por variaciones en la cristalografía y microestructura. [3] Según Oates J. [2] Para que una caliza sea calificada como conveniente para un proceso de calcinación, debe contener como mínimo un 50 % de carbonato de calcio.

La cinética de la descomposición, especialmente de calizas granulares y en trozos, es aún más compleja. Muchos intentos se han hecho para producir una teoría unificada de la calcinación, pero todos han tenido una validez limitada. Se cree que esto ocurre debido a que:

- Varios procesos están implicados en la calcinación, cualquiera de los cuales puede ser predominante bajo circunstancias específicas.
- Las diferencias en la cristalografía y la microestructura de piedra caliza que son difíciles de cuantificar, pueden tener un efecto notable.
- La microestructura de la cal viva (y en particular de la capa superficial) puede tener un efecto significativo. Esto depende de la temperatura, las impurezas y el tiempo de exposición después de la finalización de la calcinación.

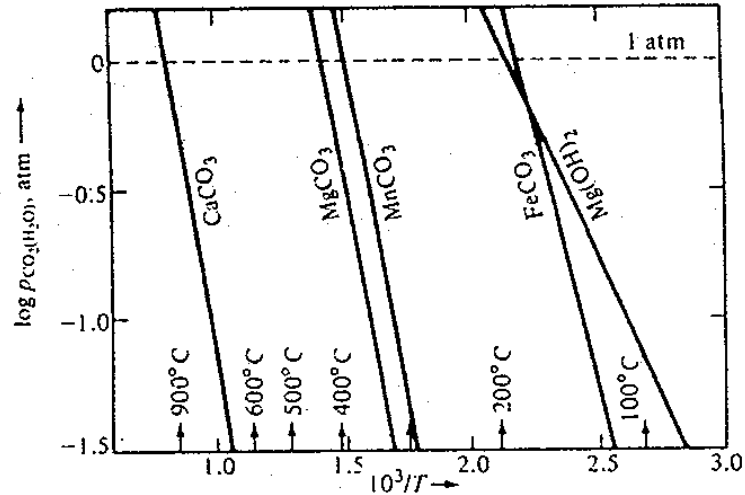
Debido a las complejidades anteriores, las características de calcinación de una piedra caliza en particular, se determinan preferiblemente por ensayos prácticos.

Para la obtención del Óxido de Calcio, o Cal viva calcítica, es necesario sobrepasar la presión de disociación del Carbonato de Calcio mediante una reacción reversible muy endotérmica, lo que significa que ésta se ve directamente favorecida por temperaturas altas. Según B.R. Stanmore y P. Gilot [11] esta reacción requiere de aproximadamente 182.1 kJ/mol de calor. El carbonato de calcio se descompone mediante el calor de acuerdo con la ecuación 1.



El diagrama termodinámico de estabilidad mostrado en la figura 2, permite predecir la temperatura de descomposición de un carbonato (en este caso para el $CaCO_3$) a una presión dada; por ejemplo a una atmósfera de presión la temperatura de descomposición del carbonato de calcio es de aproximadamente 900°C, el cual es el carbonato más estable en comparación de los otros mostrados en el diagrama. [13]

Figura 2. Presión de descomposición (logarítmica) de varios carbonatos e hidratos en función del inverso de la temperatura. [13]



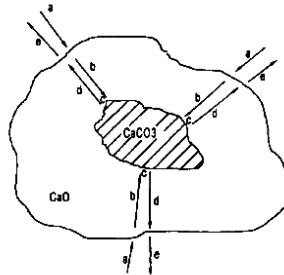
La rapidez de calcinación parece estar controlada principalmente por el suministro de calor de descomposición necesario. La rapidez química de descomposición de la caliza a 900°C es relativamente elevada, por lo que la velocidad de calcinación está controlada por el suministro de calor necesario por conducción a través de la capa de caliza calcinada; por lo tanto la velocidad de descomposición en este caso está gobernada por las mismas ecuaciones 2 y 3 que describen las reacciones controladas por difusión:

$$t \propto d^2 \quad (2) \quad V \propto \frac{1}{d^2} \quad (3)$$

Es decir la velocidad es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro y al tiempo necesario para completar la calcinación que es proporcional al cuadrado del diámetro. Según Cisternas L, Montenegro M. y Urqueta C. [12], la velocidad de descomposición del CaCO₃ a 900 °C es muy pequeña, por lo que resulta conveniente y económico efectuar la calcinación a una temperatura entre 1100 y 1200 °C.

La disociación de la piedra caliza por encima de la temperatura de descomposición puede ser considerada en cinco etapas, como se observa en la figura 3.

Figura 3. Ilustración de los procesos involucrados en la disociación de la piedra caliza. [2]



- a) El calor se transfiere desde los gases del horno hasta la superficie de la partícula en descomposición.
- b) El calor se transfiere de la superficie a la interfase de reacción a través de la capa microporosa de cal.
- c) El calor que llega a la interfase de reacción provoca la disociación de CaCO_3 en CaO y CO_2 .
- d) El CO_2 producido migra desde la interfaz de reacción, a través de la capa de cal a la superficie de la partícula, y simultáneamente se calienta desde la temperatura de la zona de reacción, a la de la superficie.
- e) CO_2 migra lejos de la superficie en los gases del horno.

La química y física de los procesos (a), (c) y (e) son relativamente bien conocidos, pero el efecto de la microestructura de la capa de cal, en (b) y (d) es complejo y depende en parte de las características de la piedra caliza. Otras complicaciones surgen cuando se producen cambios en la estructura de la capa superficial de la cal, causadas por sinterización, escorificación y absorción de dióxido de azufre.

La dificultad en la producción de una teoría unificada de la cinética de la calcinación es que sería necesario tener en cuenta todos los procesos anteriores, cualquiera de los cuales puede llegar a ser determinante en la velocidad para determinadas circunstancias.

4. METODOLOGÍA

4.1 ETAPA 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Se realizó de forma continua la búsqueda, lectura y análisis durante el desarrollo de todo el proyecto, de libros, artículos científicos, revistas, trabajos de grado, páginas web, bases de datos y demás fuentes enfatizadas que contienen información relacionada con:

- Generalidades, propiedades, características y procesamiento de minerales calcáreos.
- Proceso y variables operativas de molienda y calcinación.

4.2 ETAPA 2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y DIAGNÓSTICO DE LAS PLANTAS INDUSTRIALES.

Para la recolección de muestras y diagnóstico inicial de los procesos, se realizó la visita técnica en Abril del 2012 al distrito minero los Santos, específicamente en los municipios de Curití, Zapatoca y los Santos, del departamento de Santander. Se visitó una planta industrial por cada municipio en donde se tomaron las muestras representativas del mineral calcáreo necesarias para llevar a cabo los análisis y pruebas.

Se realizó un diagnóstico general que incluye el sistema de producción, seguridad Industrial, comercialización y estado actual de las tres plantas industriales donde fueron tomadas las muestras. La visita se realizó en tres de los cuatro municipios que conforman el distrito minero Los Santos con el fin de abarcar los puntos más representativos del territorio.

Las muestras obtenidas fueron reducidas de tamaño en una trituradora de mandíbulas marca Retsch modelo BB200 perteneciente al laboratorio de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

4.3 ETAPA 3. CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.

Para la correspondiente caracterización del mineral calcáreo se emplearon las siguientes técnicas:

4.3.1 Análisis cuantitativo de difracción de rayos x (DRX): Se realizó para determinar los compuestos cristalinos presentes en cada muestra de mineral calcáreo. El análisis fue realizado por el laboratorio de rayos X en la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander con un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo ADVANCE de Geometría DaVinci el cual opera en un rango de medición de muestras entre 3.5 y 70 grados 2θ , 30kV y 15 mA; tipo de barrido a pasos con filtro de níquel.

4.3.2 Determinación del porcentaje de CaO y pérdidas por ignición: A partir de un análisis gravimétrico citado en el numeral 16 de la norma ASTM C-25 [15], se logró determinar el contenido de CaO total para cada muestra de mineral tomadas durante la visita técnica. El numeral 19 de la misma norma permitió establecer las pérdidas por ignición para cada muestra.

4.3.3 Análisis granulométrico por tamizaje: Con base en la norma ASTM D-422. [16] se logró realizar un análisis granulométrico del mineral triturado, con el fin de caracterizar el tamaño de partícula para posteriormente ser llevado a un proceso de molienda. El mineral seco fue caracterizado utilizando el Ro-tap ubicado en el laboratorio de beneficio de minerales el cual trabaja a 60 Hz y 110v junto con la serie de tamices ASTM 3/4", 1/4", 4m, 10m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m y 200m.

4.4 ETAPA 4. PRUEBAS PRELIMINARES Y ASIGNACIÓN DE VALORES A LAS VARIABLES OPERATIVAS.

Con la muestra de mineral obtenida se realizaron pruebas preliminares de los procesos de molienda en seco y calcinación, mediante las cuales se determinó el nivel más adecuado de las variables operativas a evaluar en el desarrollo experimental (etapa siguiente).

Fue seleccionada una muestra representativa correspondiente aproximadamente 200 [g] de mineral sin clasificar, obtenida mediante un cortador de rifles de 12 canales marca HUMBOLDT, modelo H-3985, la cual se llevó a molienda por tiempos de 2,4,8,16 y 32 minutos con una carga de bolas equivalente a 14% de la capacidad del molino.

Con el análisis granulométrico de la muestra de mineral obtenida del proceso de trituración, se determinó que entre las mallas $\frac{1}{4}$ " y 4m se encuentra aproximadamente entre el 40% y el 54% peso del mineral evaluado y el restante en tamaños menores correspondientes a las mallas inferiores a la 4m. Por tal razón el tamaño de (D_p) referencia para un posterior análisis fue el correspondiente a 4750 μm .

4.5 ETAPA 5. DESAROLLO EXPERIMENTAL.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares, y la caracterización previa del mineral, se realizaron los siguientes estudios:

- **MOLIENDA:** Fue realizada en un molino de bolas que trabaja a 1725 rpm, ubicado en el laboratorio de Beneficio de Minerales de la universidad Industrial de Santander; durante este proceso se tuvo en cuenta las siguientes variables: tiempo de molienda, carga de bolas y tamaño de

alimento. Los rangos fueron determinados mediante pruebas preliminares, las cuales se realizaron bajo los parámetros que se presentan en la tabla 12. Los resultados obtenidos se evaluaron mediante la variable respuesta del porcentaje de mineral pasante malla 100 y la ayuda de un paquete estadístico.

- **CALCINACIÓN:** Durante esta etapa, se escogieron tamaños de mineral retenido por los tamices $\frac{1}{4}$ ", 20m y 80m, de los cuales fueron tomadas muestras aproximadamente de 5 [g] para llevar a calcinación en una Mufla marca Heraeus a temperaturas de 1000 y 1100°C durante 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos; para calcinar a 1200°C se utilizó un horno tubular marca DIETERT, y los tiempos de exposición fueron los mismos.

Las muestras fueron pesadas antes y después de Calcinadas, en una balanza analítica marca AINSWORTH con una precisión de 5 decimales, para calcular el porcentaje de pérdida en peso.

Se le realizó análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) a 3 muestras seleccionadas según las curvas de calcinación con un equipo QUANTA FEG 650 ubicado en el laboratorio de microscopia en el Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG) de la Universidad Industrial de Santander. Este análisis se hizo a tres muestras de 6300µm calcinadas bajo diferentes condiciones, llevándolas hasta un aumento de 6000.

Además se realizó análisis morfológico con electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BSE), para observar variación composicional en las muestras analizadas. También el análisis EDS (espectrómetro de dispersión de energía) de rayos X el cual identifica de manera semi-cuantitativa los elementos químicos que se encuentran presentes en la muestra, mostrando gráficas e imágenes relacionadas con esa distribución.

4.6 ETAPA 6: PROPUESTA DE UN FLUJOGRAMA PARA EL PROCESAMIENTO DE MINERALES CALCÁREOS.

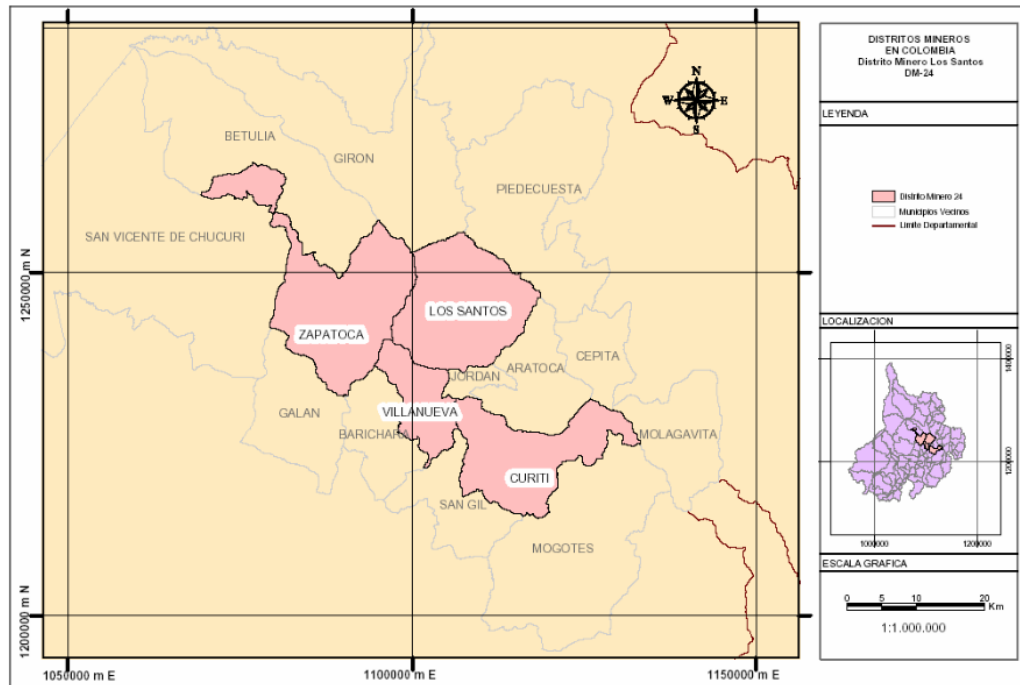
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, se realizó una propuesta de Flujoograma para el procesamiento de beneficio de minerales calcáreos en el distrito minero Los Santos.

5. RESULTADOS

5.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS DE MINERAL CALCÁREO Y DIAGNÓSTICO DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS.

5.1.1 Descripción del yacimiento. El distrito minero los Santos DM-24, está constituido por los municipios de Curití, Los Santos, Villanueva y Zapatoca, pertenecientes al departamento de Santander tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Mapa de los municipios que conforman el distrito minero Los Santos DM- 24. [14]



Según el IGAC (*Instituto Geográfico Agustín Codazzi*), el distrito minero Los Santos tiene un territorio constituido en su mayor parte por zonas montañosas; presenta zonas onduladas y partes muy quebradas y abruptas en el área cercana al río Chicamocha. [14]

Las actividades económicas de mayor importancia son la agricultura y la minería, en la cual se destaca la explotación de yeso y caliza; los procesos de explotación que se llevan a cabo son de forma rudimentaria y de baja escala de producción.

La caliza es la roca mas extendida en el departamento de Santander. Se presenta principalmente en las Formaciones Rosa Blanca, la Paja, Simití y Tablazo que están en una faja de las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental. El yacimiento del municipio de Curití, se encuentra en la Formación Rosa Blanca y está localizado sobre la carretera Bucaramanga-Bogotá. [14]

Buena parte de la producción de caliza sirve de materia prima para la fabricación de cemento. Un bajo porcentaje se utiliza en la producción de concentrados para aves, empresas constructoras y por distribuidores de cal. [3]

5.1.2 Recolección de las muestras. Durante la visita técnica realizada a los municipios de Curití, Zapatoca y Los Santos, se recolectaron las muestras de mineral calcáreo necesarias para llevar acabo los correspondientes análisis. En la figura 5, se observa el yacimiento del mineral calcáreo correspondiente al municipio Los Santos.

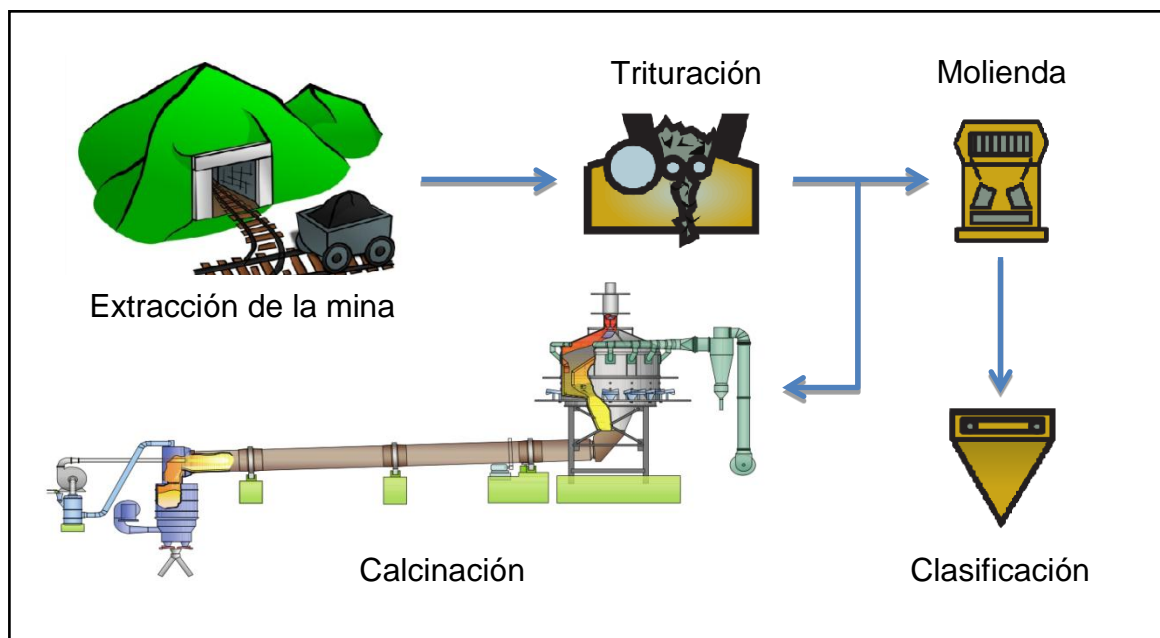
Figura 5. Yacimiento del mineral calcáreo en el municipio Los Santos.

Fuente: Autores.



5.1.3 Producción. El procesamiento de minerales calcáreos en el distrito minero Los Santos, se lleva acabo de una forma rudimentaria y de producción a baja escala. El proceso de producción como se observa en la figura 6, consta básicamente de una trituración primaria en la cual se reduce el mineral a un tamaño apropiado para ser alimentado en un molino, el cual se adecúa de acuerdo a el tamaño que es necesario producir en mayor cantidad; seguidamente pasa por un sistema de clasificación el cual distribuye el mineral para ser empackado o llevarse a un proceso posterior como calcinación. Los procesos son llevados a cabo de forma empírica, regulados únicamente por la observación y los parámetros que ha dado la experiencia de los trabajadores más antiguos.

Figura 6. Diagrama del procesamiento de minerales calcáreos en el distrito minero Los Santos. Fuente: Autores.



En las empresas en las cuales fueron tomadas las muestras de mineral calcáreo de los diferentes municipios, se presentan equipos similares para llevar a cabo el procesamiento de la piedra caliza, entre estos se encuentran los molinos (ver figura 7); para la separación por tamaño se utilizan clasificadores verticales como

el que se presenta en la figura 8; y en el proceso de calcinación se emplean hornos artesanales como el observado en la figura 9.

Figuras 7 y 8. Molino de martillos y clasificador vertical ubicados en unas de las plantas industriales del municipio de Curití. Fuente: Autores.



(7)



(8)

Figura 9. Parte superior del horno utilizado para calcinación ubicado en una planta industrial del municipio de Curití. Fuente: Autores.



5.1.4 Recurso humano. Las personas que trabajan en el procesamiento de mineral calcáreo correspondiente a los municipios de Curití, Los Santos y Zapatocha, son en su mayoría familias de la región algunas con un nivel de educación media, mientras que otras no han recibido formación técnica ni académica.

5.1.5 Seguridad industrial. El nivel de accidentabilidad o la posibilidad de que ocurran accidentes laborales y enfermedades profesionales de las personas que están involucradas con el proceso de extracción o cualquier manejo dentro del procesamiento del mineral es alto, ya que las plantas industriales que procesan mineral calcáreo en el distrito minero los santos no cuentan con la infraestructura adecuada, señalización, ni elementos de protección personal (EPP) para minimizar los riesgos a los que están expuestos los trabajadores.

Las actividades que se realizan en estas empresas principalmente presentan problemas con altas concentraciones de material particulado en el ambiente y ruido, producidos durante los procesos de conminución; los operarios cargan constantemente bultos de mineral sin utilizar fajas de seguridad industrial y están expuestos a altas temperaturas durante los procesos de calcinación.

Agentes contaminantes del aire en la industria minera, pueden llegar a causar diferentes afecciones sobre los trabajadores, debido a la presencia componentes o agentes contaminantes volátiles. Dentro de los agentes contaminantes liberados en las plantas industriales visitadas, se logró observar polvos, material particulado en suspensión, gas (generalmente CO₂) y humos; los cuales se presentan desde el momento en que la piedra caliza es transportada y durante los procesos de transformación. Dichos contaminantes pueden producir afecciones en el trabajador tales como tos, congestión de los ojos, irritación de la garganta, enfermedades respiratorias, asma o bronquitis, daños renales, cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares.

La falta de iluminación para el desarrollo de las actividades en las plantas industriales visitadas incrementa la posibilidad que ocurran accidentes, debido a que no se visualizan rápidamente los peligros que se encuentran a lo largo del área de trabajo de los operarios. Debido a que la cantidad de iluminación es un factor indispensable en la comodidad que debe brindar el ambiente de trabajo de cada persona, también disminuye el interés por el desarrollo de las actividades ya que éste no se siente cómodo en la ejecución de su actividad.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

Las empresas que se dedican al procesamiento de mineral calcáreo en el distrito minero Los Santos que producen caliza granulada y cal viva, actualmente no cuentan con una caracterización apropiada del mineral, por lo cual se hace necesario determinar algunas de las propiedades, las cuales consideramos más relevantes a partir de técnicas y procedimientos que se describen a continuación:

5.2.1 Difracción de Rayos X. En las figuras 10, 11 y 12 se puede observar los difractogramas correspondientes a las muestras de Curití, Los Santos y Zapatoca respectivamente. Mediante el análisis cuantitativo realizado por el método Rietveld se logró cuantificar las especies cristalinas de mayor relevancia presentes en la composición del mineral, como se presenta en las tablas adjuntas a cada Difractograma.

Los minerales pertenecientes a los municipios de Los Santos y Curití, presentan en su composición principal Calcita (carbonato de calcio) 74.4% y 97.3% respectivamente; el cual solo se encuentra presente en tan solo 10.4% del mineral proveniente del municipio Zapatoca el cual está constituido principalmente de yeso y anhidrita. Dentro de las impurezas se puede mencionar el cuarzo como la más representativa y común a los tres minerales, en menor proporción se puede referir a la moscovita y hematita.

Figura 10. Difractograma del mineral perteneciente al municipio de Curití.

Fuente: Autores.

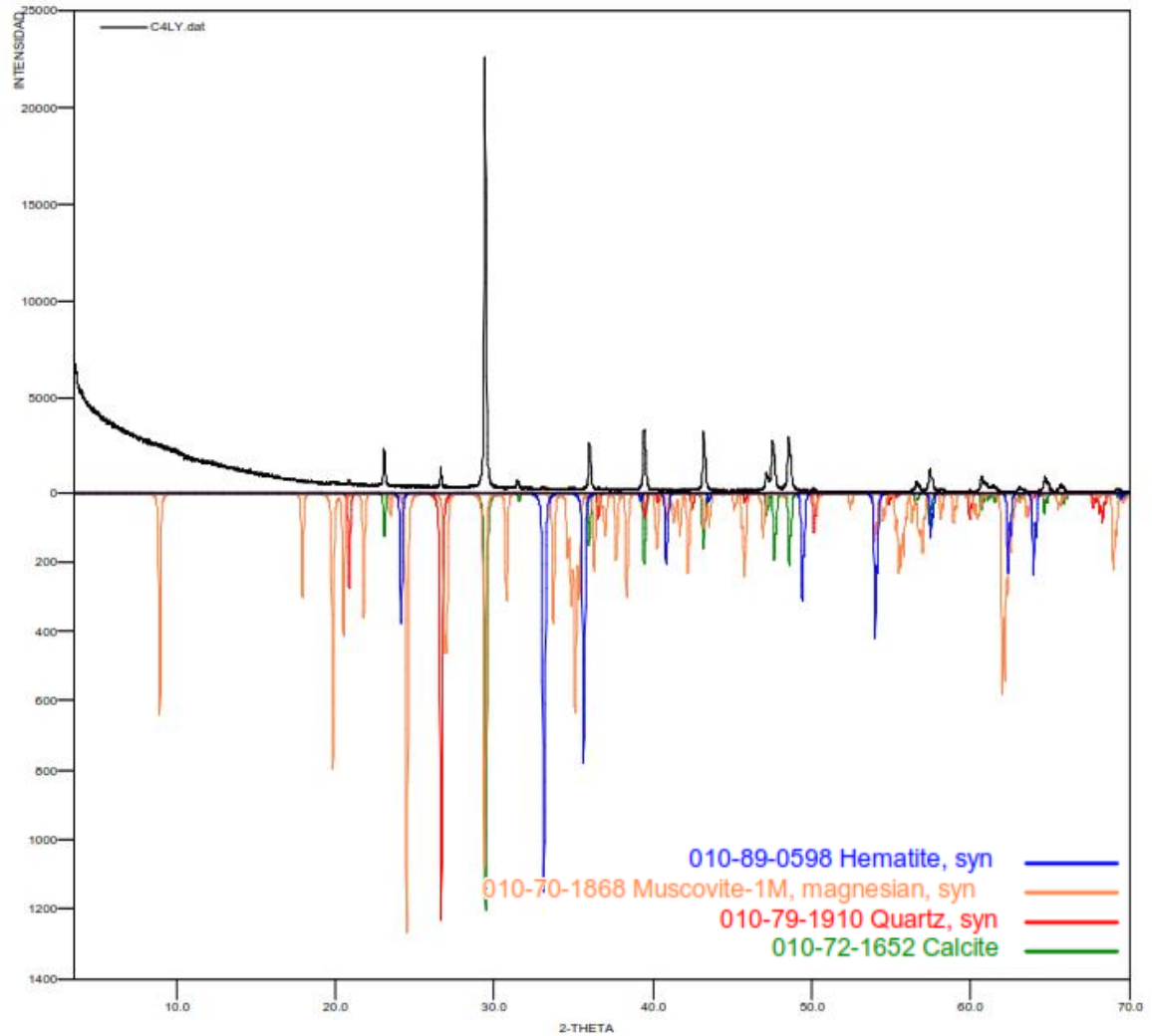


Tabla 2. Cuantitativo de las especies cristalinas del mineral perteneciente al municipio de Curití. Fuente: Autores.

	FASE	No. TARJETA	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O ₂	010-79-1910	Cuarzo	2.5 % (0.0)
	Ca CO ₃	010-72-1652	Calcita	97.3 % (0.3)
	Fe ₂ O ₃	010-89-0598	Hematita	0.2 % (0.0)
	$K Al (Mg_{0.2} Al_{0.8}) (Al_{0.42} Si_{3.58}) O_{10} (OH)_2$	010-70-1868	Moscovita	N.C

Figura 11. Difractograma del mineral perteneciente al municipio de Los Santos.

Fuente: Autores.

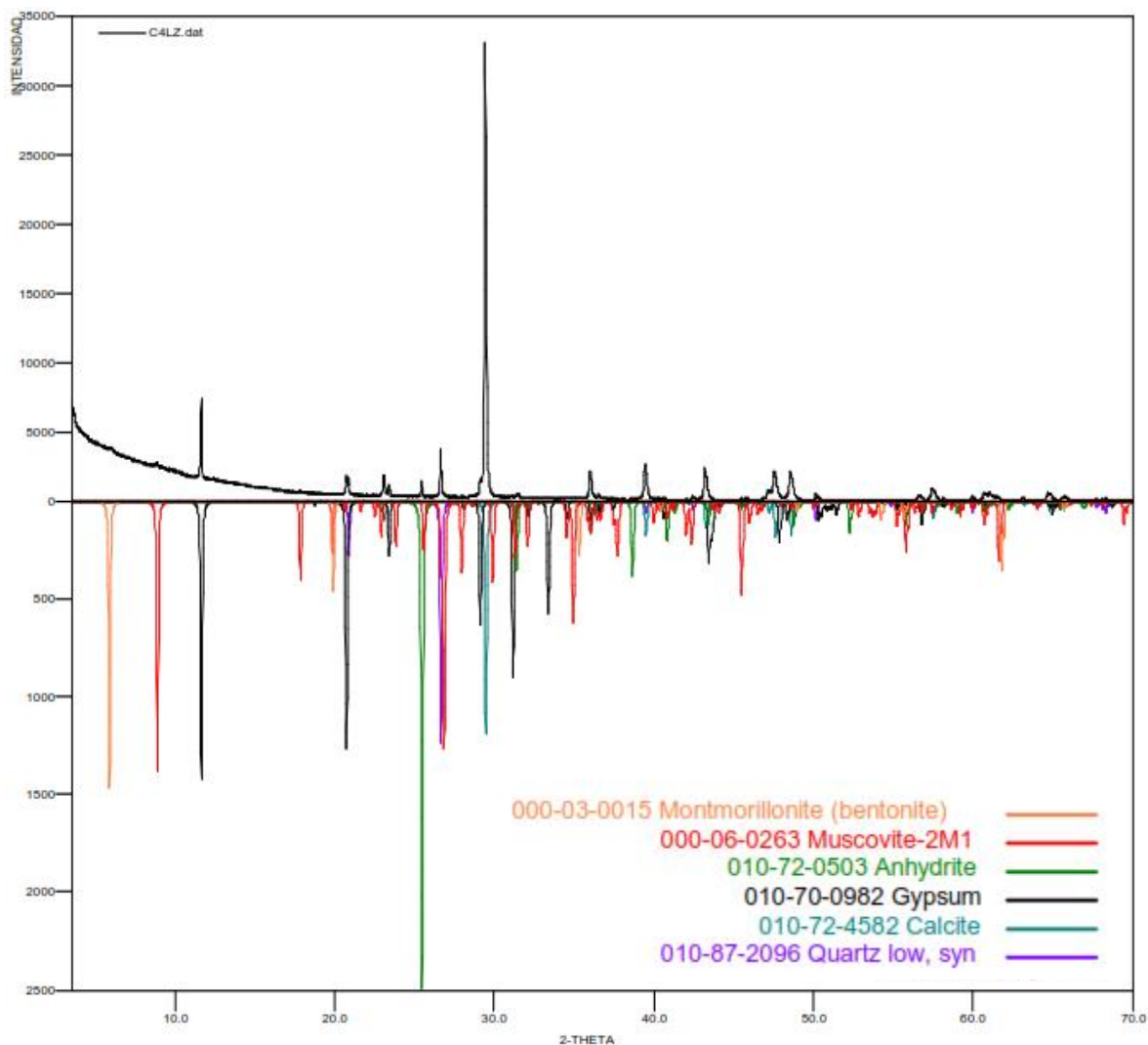


Tabla 3. Cuantitativo de las especies cristalinas del mineral perteneciente al municipio de Los Santos. Fuente: Autores.

	FASE	No. TARJETA	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O ₂	010-87-2096	Cuarzo	12.7 % (0.1)
	Ca CO ₃	010-72-4582	Calcita	74.4 % (0.3)
	Ca (SO ₄)	010-72-0503	Anhidrita	0.6 % (0.1)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-06-0263	Moscovita	2.2 % (0.3)
	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	010-70-0982	Yeso	10.1 % (0.1)
	(Na, Ca) _{0.3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · x H ₂ O	000-03-0015	Montmorillonita	N.C

Figura 12. Difractograma del mineral perteneciente al municipio de Zapatoca.

Fuente: Autores.

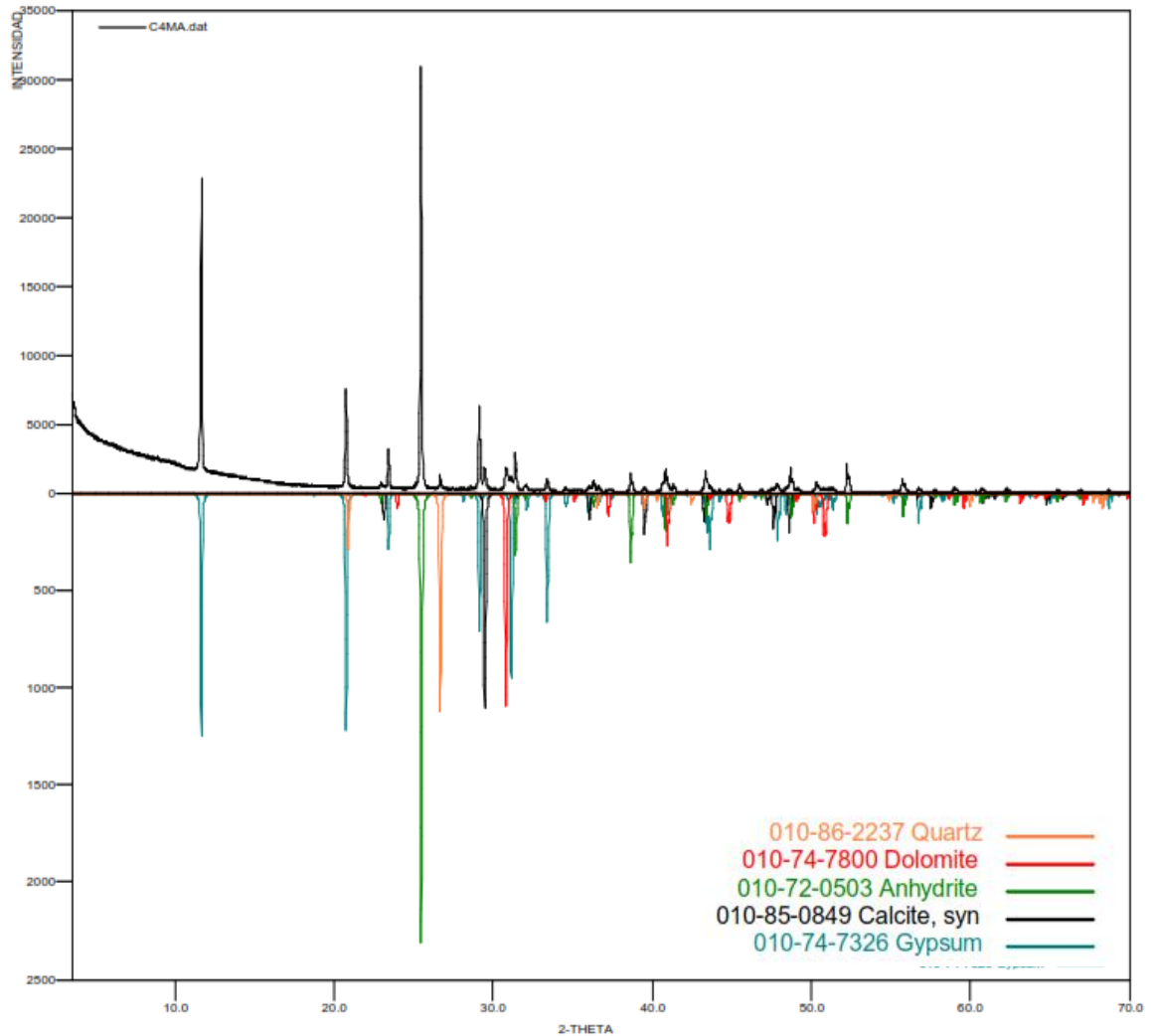


Tabla 4. Cuantitativo de las especies cristalinas del mineral perteneciente al municipio de Zapatoca. Fuente: Autores.

	FASE	No. TARJETA	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O ₂	010-86-2237	Cuarzo	2.4 % (0.1)
	Ca CO ₃	010-85-0849	Calcita	10.8 % (0.2)
	Ca (SO ₄)	010-72-0503	Anhidrita	36.0 % (0.2)
	Ca (Ca _{0.17} Mg _{0.83}) (CO ₃) ₂	010-74-7800	Dolomita	5.4 % (0.1)
	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	010-74-7326	Yeso	45.4 % (0.2)

El análisis cuantitativo que se presenta en las tablas 2, 3 y 4 permite clasificar según el Mineralogy and Petrology Group British Geological Survey [4] la caliza perteneciente al municipio de Curití como de Alta Pureza con pequeños contenidos de sílice, mientras que el mineral perteneciente al municipio de Los Santos es de baja pureza ya que presenta contenidos de yeso y sílice que reducen el contenido total de carbonato de calcio a 74,4%.

Caso particular ocurre con el mineral perteneciente al municipio de Zapatoca, el cual contiene en su mayor composición yeso y anhidrita, mientras que el contenido total de carbonato de calcio es tan solo ligeramente mayor al 10%. A partir de estos resultados se puede determinar que el mineral que está siendo comercializado en el municipio de Zapatoca no corresponde a una caliza sino a un mineral de yeso el cual requiere de un procesamiento diferente.

5.2.2 Pérdidas por Ignición. Los resultados que se presentan en la tabla 5 muestran que el mineral calcáreo de Curití presentó el mayor porcentaje de pérdida por ignición (*Loss on ignition* LOI) debido a la alta pureza del mineral, en el cual está ocurriendo principalmente la liberación de CO₂, mientras que en el mineral de Los Santos, el contenido de yeso y sílice disminuye el contenido de carbonato de calcio lo cual disminuye la pérdida de material volátil. Al mineral perteneciente al municipio de Zapatoca, no se le realizó el análisis de pérdidas por ignición, debido a que al no ser una caliza, se sale del alcance de la norma ASTM C-25.

Tabla 5. Resultados pérdidas por ignición. Fuente: Autores.

MINERAL	% PÉRDIDAS POR IGNICIÓN			
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PROMEDIO
Curití	40,091	39,812	40,187	40,030± 0,159
Los Santos	38,580	37,300	38,696	38,192± 0,632

5.2.3 Determinación del porcentaje de CaO. El mineral obtenido en los municipios de Curití y Los Santos, presenta diferentes valores del contenido de CaO total los cual se registran en la tabla 6. Según esto es posible observar que el mineral calcáreo perteneciente al municipio de Curití es el que presenta el mayor contenido de CaO total, lo cuál indica que al realizar un proceso de calcinación el producto obtenido (cal viva), será de mayor calidad en términos de pureza (composición).

Al mineral perteneciente al municipio de Zapatoaca, no se le realizó el análisis para la determinación de CaO total, debido a que al no ser una caliza, se sale del alcance de la norma ASTM C25.

Tabla 6. Porcentajes de CaO total en las diferentes muestras de mineral.

Fuente: Autores

MINERAL	CONTENIDO DE ÓXIDO DE CÁLCIO % CaO TOTAL			
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	%PROMEDIO
Curití	57,195	57,637	58,051	57,628± 0,349
Los Santos	42,539	41,178	41,937	41,885± 0,557

5.2.4 Determinación de la distribución granulométrica del mineral. Luego de obtener las muestras correspondientes en los municipios de Zapatoaca, Curití y los Santos, se realizó el proceso de conminución primaria (trituration) de cada muestra, a la cuál se le realizó un análisis de distribución granulométrica de acuerdo con la norma ASTM D-422.

En las figuras 13, 15 y 17 se presentas las curvas que relacionan el porcentaje en peso retenido en cada tamiz, en donde se aprecia que los tamaños entre 6300 µm y 2000 µm son los más relevantes, debido a que representan aproximadamente el 80% de la distribución granulométrica del mineral.

Figura 13. Grafica porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: Curití.

Fuente: Autores

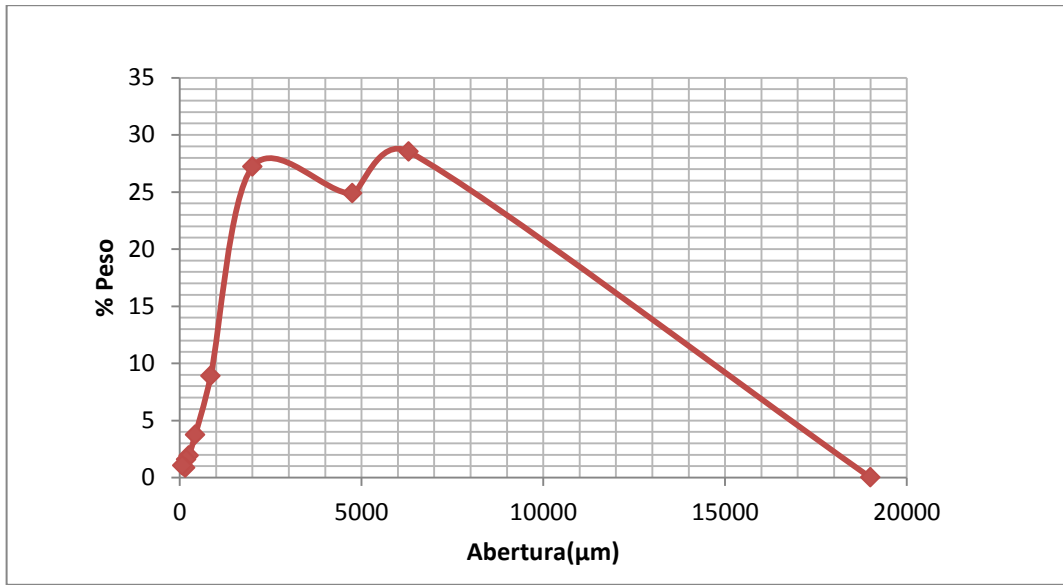


Figura 14. Grafica de la Relación entre el porcentaje en peso pasante y retenido

Vs Abertura del tamiz – Mineral: Curití. Fuente: Autores

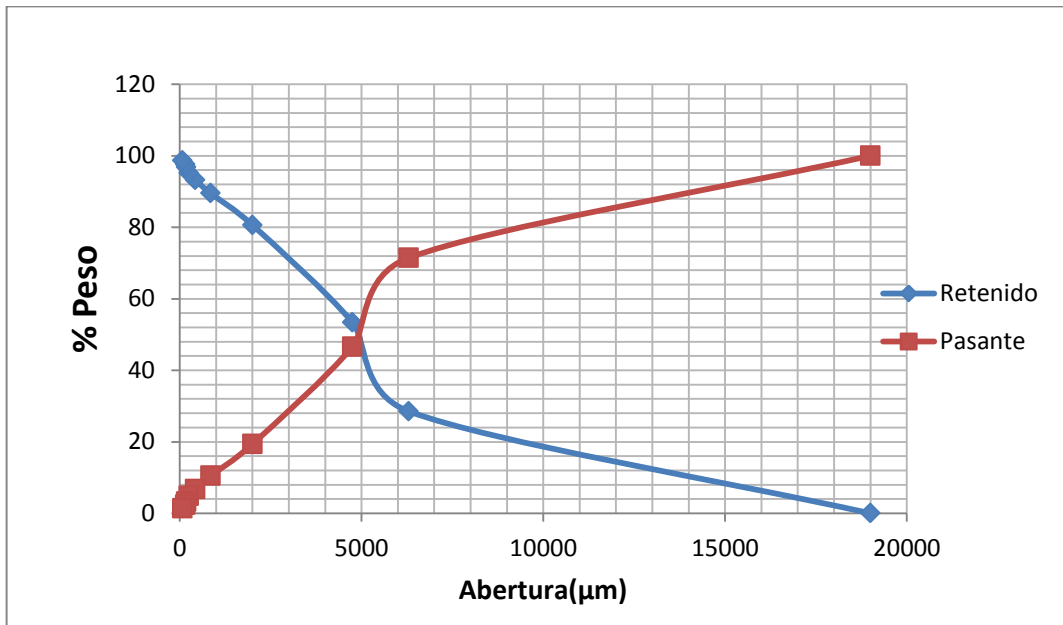


Figura 15. Grafica Porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: los Santos. Fuente: Autores.

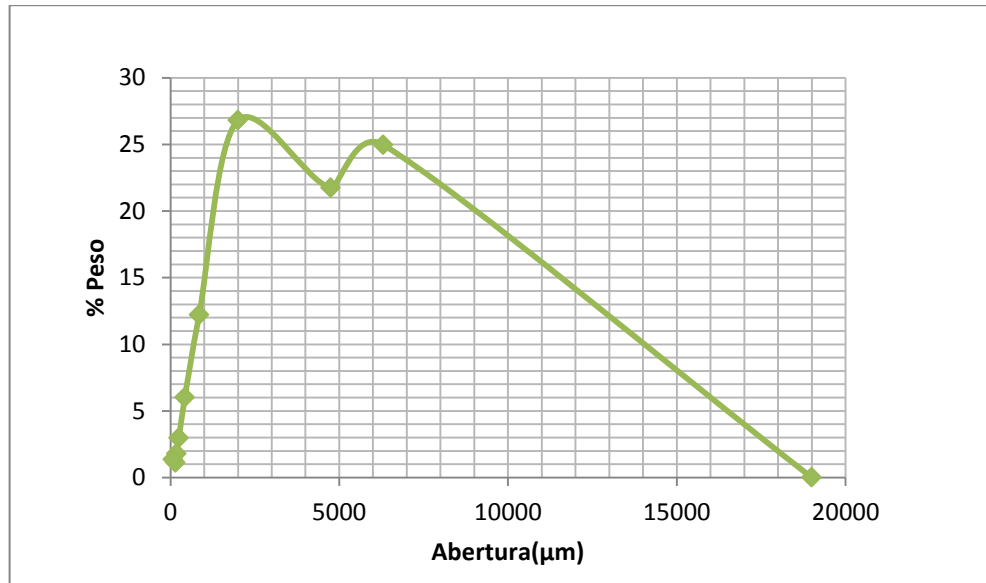


Figura 16. Grafica de la Relación entre el porcentaje en peso pasante y retenido Vs Abertura del tamiz – Mineral: Los Santos. Fuente: Autores.

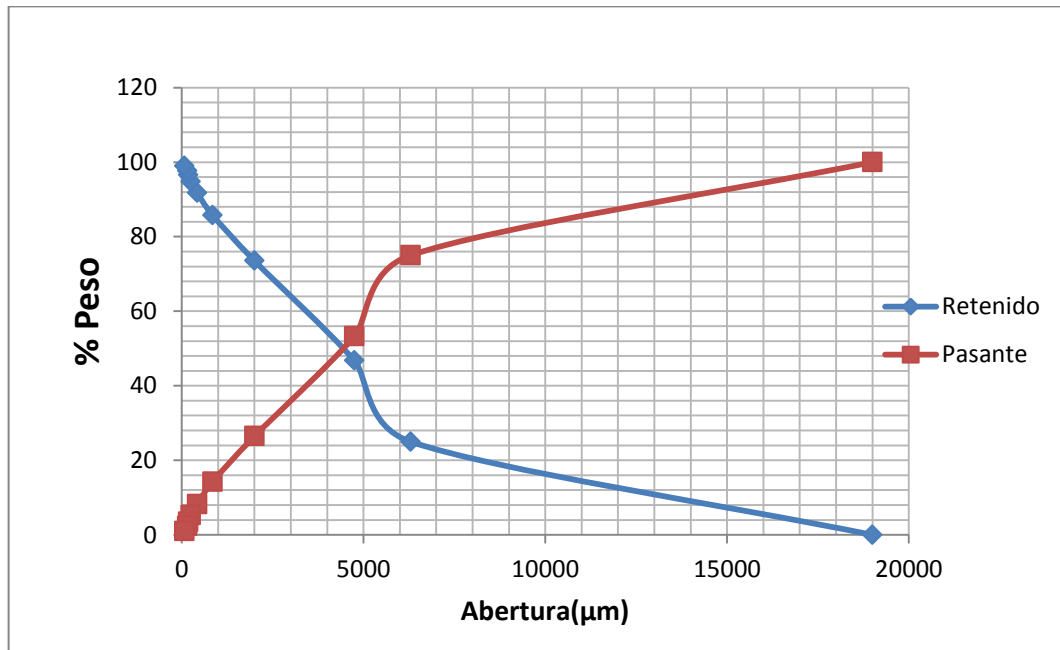


Figura 17. Grafica Porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: Zapatoca.

Fuente: Autores.

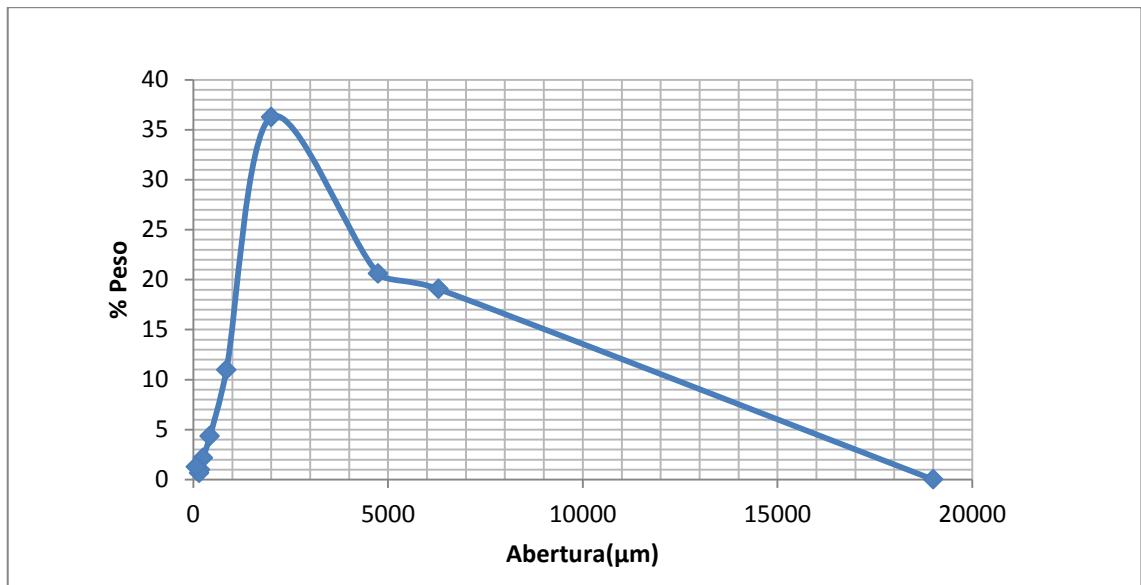
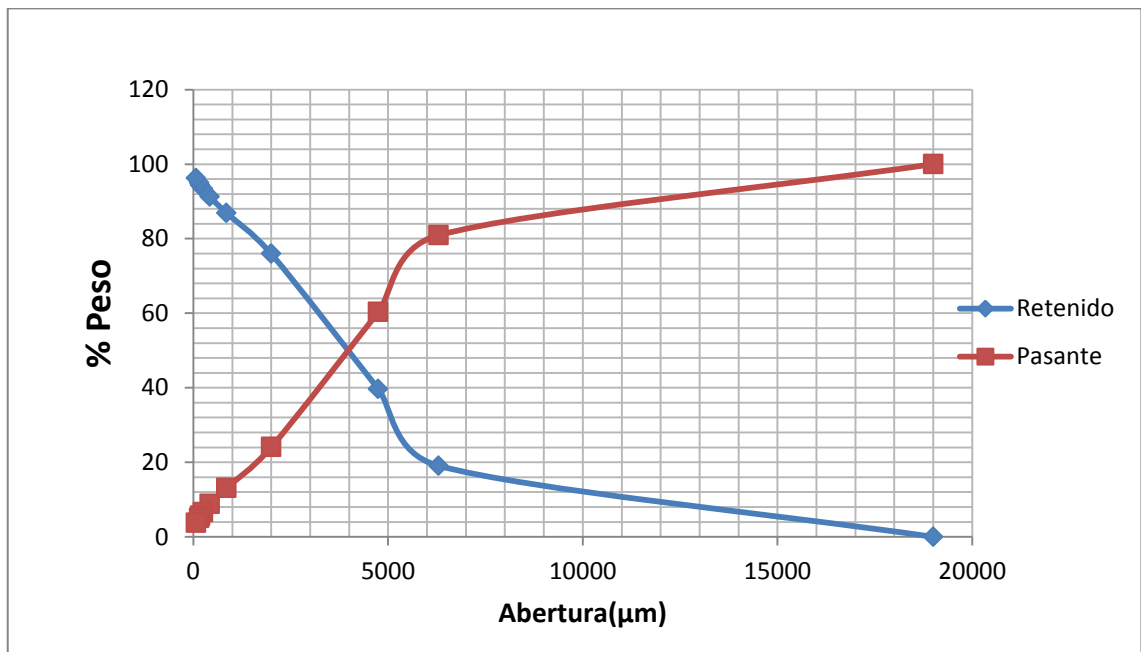


Figura 18. Grafica de la Relación entre el porcentaje en peso pasante y retenido Vs Abertura del tamiz – Mineral: Zapatoca. Fuente: Autores.



En la figura 17 se puede observar que el mineral de Zapatoca presenta el mayor contenido de mineral de tamaño 2000 μm ; de forma similar se muestra que del total de mineral puesto en análisis, en los tres tamices 1/4", 4m y 10m, está la mayor cantidad del mineral después de la trituración lo cual corresponde a un 75,93 % del peso, quedando solo un 24,07% en los demás tamices.

De forma general para los tres minerales con la finalidad de encontrar una correlación de los datos, se observa en las gráficas 13, 15 y 17 que en las mallas 1/4" y 4m se encuentra aproximadamente entre el 40% y el 54% peso del mineral evaluado y el resto en tamaños menores correspondientes a las mallas inferiores a la 4m. Por tal razón el tamaño de (Dp) referencia para un posterior análisis es el correspondiente al de 4750 μm .

Por otra parte, los resultados del análisis granulométrico pueden ser generalizados y correlacionados por expresiones matemáticas expresadas como las funciones de distribución de tamaño, las cuales relacionan el tamaño de partícula (abertura malla) con un porcentaje en peso acumulado ya sea pasante o retenido.

La Función de distribución de Rosin-Rammler esta dada por:

$$g(x) = 100e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m} \quad (4)$$

Donde g(x): Porcentaje peso acumulado retenido; x: Abertura en (μm); m y k: son constantes.

➤ Curití

$$g(x) = 100e^{-\left(\frac{x}{17378,571}\right)^{0,8537}}$$

➤ Los Santos

$$g(x) = 100e^{-\left(\frac{x}{12439,00684}\right)^{0,9263}}$$

➤ Zapatoca

$$g(x) = 100e^{-\left(\frac{x}{14329,01}\right)^{0,74}}$$

La Función de distribución de tamaño Gaudin-Schuman esta dada por:

$$f(X) = 100 \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad (5)$$

Donde f(x): porcentaje peso pasante acumulado; x: Abertura en (µm); m y k: son constantes

➤ Curití

$$f(X) = 100 \left(\frac{x}{13627,72512}\right)^{0,8012}$$

➤ Los Santos

$$f(X) = 100 \left(\frac{x}{11049,77}\right)^{0,835}$$

➤ Zapatoca

$$f(X) = 100 \left(\frac{x}{14041,13}\right)^{0,6601}$$

Los resultados obtenidos con estas fórmulas de distribución de tamaño 4 y 5 para cada mineral, se relacionan en la tabla 7:

Tabla 7. Funciones de distribución de tamaños Rosin-Rammler y Gaudin-Schuman para cada mineral. Fuente: Autores.

Curití		Los Santos		Zapatoca	
g(x)	f(x)	g(x)	f(x)	g(x)	f(x)
33,99	131,38	22,75	157,24	29,17	122,1
65,67	53,07	58,71	62,55	58,02	58,92
71,86	42,08	66,37	49,41	64,29	48,9
85,39	20,68	83,2	24	79,22	27,63
92,68	10,24	92,01	11,75	88,37	15,7
95,88	5,8	95,71	6,58	92,86	9,94
97,36	3,75	97,36	4,23	95,12	7
98	2,86	98,04	3,21	96,16	5,64
98,28	2,47	98,34	2,76	96,63	5
99,05	1,4	99,13	1,55	97,97	3,16
100	0	100	0	100	0

Al observar los resultados de la tabla 7 y la distribución granulométrica de cada una de las muestras evaluadas, se puede plantear que la función de distribución de tamaños más acorde con las tres muestras de mineral calcáreo del distrito minero Los Santos, es la función que relaciona el porcentaje en peso retenido y la abertura de malla. ésta corresponde a la función de **Rosin-Rammler** debido que los resultados encontrados por dicha función se acercan más a los obtenidos en el análisis de distribución granulométrica propuesto para cada una de las muestras en estudio, es decir que esta función podría determinar mejor los valores teóricos de la distribución de tamaños.

5.3 PRUEBAS PREELIMINARES

Con la finalidad de obtener el rango más apropiado para realizar los análisis de las variables que tienen fundamento en la etapa de molienda, fue necesaria la realización de una serie de pruebas para cada una de las tres muestras tomadas en los municipios del distrito minero Los Santos. Estas pruebas consisten en utilizar una carga de bolas constante con el propósito de obtener el tiempo mas apropiado de molienda, es decir en el cual no ocurran cambios en la distribución granulométrica al mantener por más tiempo el mineral en el molino. La carga usada inicialmente fue de 30 bolas de diferentes tamaños y es calculada de acuerdo a la ecuación 6¹:

$$M_{bolas} = J * V_{molino}(1 - \varepsilon) * \delta_b \quad (6)$$

M_{bolas} = Masa de bolas

J = Fracción de llenado del molino

V_{molino} = Volumen del molino

ε = Porosidad del lecho y

δ_b = Densidad de bolas

¹ LOPEZ PRINCIPE, Pedro Hugo y IPANAQUE NIZAMA, Orlando Santos. Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera Candelaria. Lima-Perú 2008.

Para efectos de cálculos el valor promedio de porosidad nominal del lecho es 0.4 y densidad de las bolas 7,86g/cm³.²

Entonces la fracción de la carga de bolas es igual a:

$$J = \frac{M_{bolas}}{V_{molino}(1 - \varepsilon) * \delta_b} = \frac{6901,46 \text{ g}}{10330,5 \text{ (cm}^3\text{)} * (1 - 0,4) * 7,86 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0,14$$

$J = 14\%$

En la tabla 8, se muestran la distribución de la carga de bolas usada en esta prueba preliminar.

Tabla 8. Porcentaje y peso de los diferentes tamaños de bolas usados en la prueba preliminar del tiempo de molienda. Fuente: Autores.

Bolas	Cantidad (N°)	Diámetro (mm)	Porcentaje (%)	Peso total (g)	Peso total (g)
Grandes	9	55,7	30	4330,33	6901,46
Medianas	12	38,3	40	1965,02	
Pequeñas	9	18,9	30	606,11	

Se usaron diferentes tamaños de bolas para aprovechar mejor los espacios en el molino. El grado de llenado del molino debe ser menor al 45% pero no demasiado bajo ($J < 7\%$), ya que los cuerpos moledores se deslizan por el blindaje del molino y por encima de este valor se originan dificultades en las trayectorias de caída de los cuerpos moledores.³

Los resultados de estas pruebas preliminares para las tres muestras de mineral calcáreo se presentan a continuación:

² RIVERA ZEBALLOS, Juan H. Compendio de conminución. Editorial Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología - CONCYTEC. Lima - Perú. 2003.

³ DUDA Walter H. Cement Data Book; Editorial Bauverlag-Wiesbaden, Berlin-Alemania marzo 2003.

Tabla 9. Resultados molienda preliminar - Mineral: los Santos. Fuente: Autores.

tiempo [min]	Peso pasante 100m [g]	% -100m
0	8,06	4,03
1	20,97	10,485
2	33,97	16,985
4	58,43	29,215
8	83,02	41,51
16	86,73	43,365
32	92,45	46,225

La tabla 9 muestra los resultados obtenidos de la variable respuesta porcentaje pasante malla 100, en diferentes tiempos, de los cuales se observa su comportamiento creciente de la cantidad de mineral fino en conjunto con el transcurso del tiempo (ver figura 19). De forma similar ocurre con los resultados obtenidos por los otros dos minerales del distrito minero los Santos, observados en las figuras 20 y 21.

Figura 19. Grafica Porcentaje peso acumulado pasante malla 100 Vs tiempo en minutos - Mineral: los Santos. Fuente: Autores.

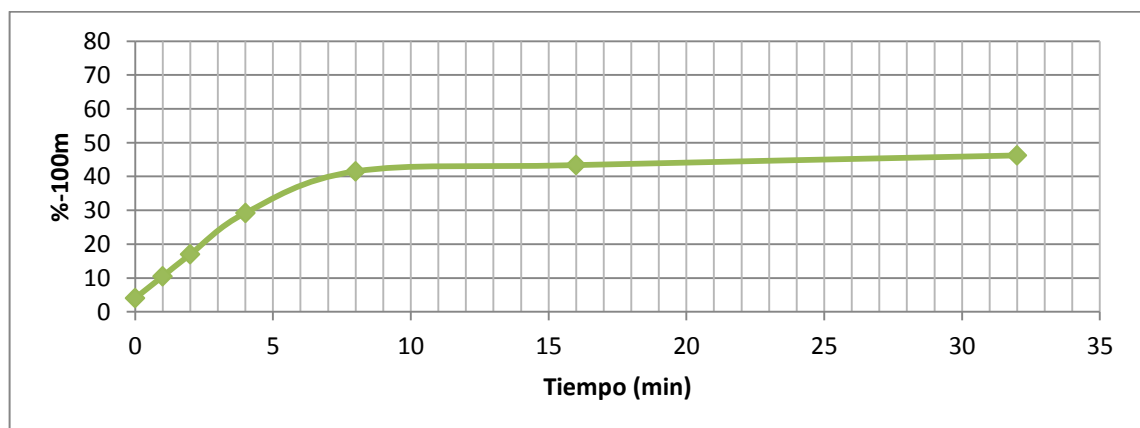


Tabla 10. Resultados molienda preliminar - Mineral: Curití. Fuente: Autores.

Tiempo [min]	Peso pasante malla 100m [g]	%-100m
0	9,65	4,825
1	20,4	10,2
2	45,79	22,895
4	71,14	35,57
8	125,21	62,605
16	142,84	71,42
32	148,57	74,285

Figura 20. Gráfica Porcentaje peso acumulado pasante malla 100 Vs tiempo en minutos - Mineral: Curití. Fuente: Autores.

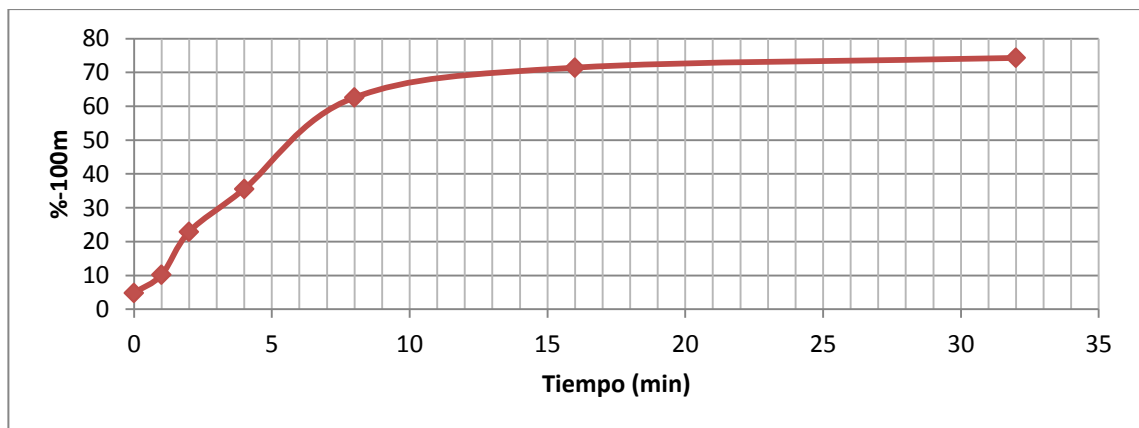
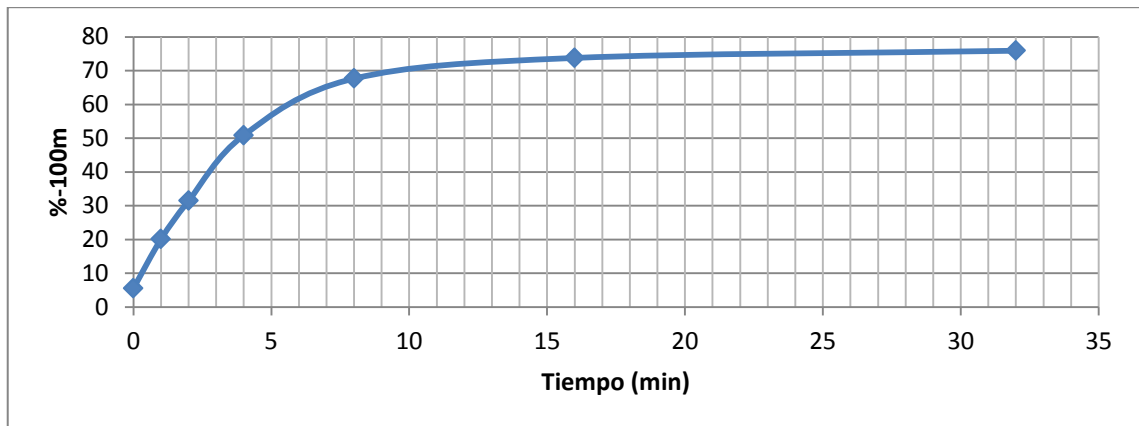


Tabla 11. Resultados molienda preliminar – Mineral: Zapatoca. Fuente: Autores.

tiempo [min]	Peso pasante malla 100m [g]	%-100m
0	11,14	5,57
1	40,22	20,11
2	62,92	31,46
4	101,71	50,855
8	135,29	67,645
16	147,53	73,765
32	151,8	75,9

Figura 21. Gráfica Porcentaje peso acumulado pasante malla 100 Vs tiempo en minutos – Mineral: Zapatoca. Fuente: Autores.



De acuerdo a las curvas en donde se presenta el porcentaje en peso pasante de la malla 100 respecto al tiempo de molienda, obtenidas de cada una de las muestras de mineral del distrito minero Los Santos; se observa que entre el intervalo de 5 a 10 minutos de molienda la variación del mineral de granulometría fina asciende hasta un punto máximo y luego tiende a estabilizarse; es decir existe un tiempo en el cual la cantidad de material fino obtenido crece en mayor magnitud, seguidamente la variación de la cantidad de mineral fino no aumenta de forma tan significativa. Este intervalo se observa de igual forma sobre cada una de las tres muestras de mineral.

5.4 MOLIENDA

De acuerdo a lo anterior, se aplicó el diseño experimental de molienda el cual busca determinar las variables más importantes, empleando un programa estadístico; el cual brinda facilidad en el manejo de variables. La distribución de las pruebas es la que se presenta en la tabla 12 para cada uno de las muestras de mineral calcáreo recolectadas en el distrito minero Los Santos.

Tabla 12. Distribución de las variables usadas en las pruebas experimentales.

Fuente: Autores.

PRUEBA	TIEMPO (min)	CARGA DE BOLAS (%)	TAMAÑO DE ALIMENTO (malla)
1	5	Cb1	(+4m)
2	5	Cb2	(+4m)
3	5	Cb1	(-4m)
4	5	Cb2	(-4m)
5	10	Cb1	(+4m)
6	10	Cb2	(+4m)
7	10	Cb1	(-4m)
8	10	Cb2	(-4m)

La distribución de la carga de bolas utilizada en durante las pruebas preliminares se relaciona en la tabla 13.

Tabla 13. Porcentaje carga de bolas. Fuente: Autores.

	GRANDES	MEDIANAS	PEQUEÑAS	Carga de bolas (J)
Cb1	40%	40%	20%	17%
Cb2	20%	40%	40%	12%

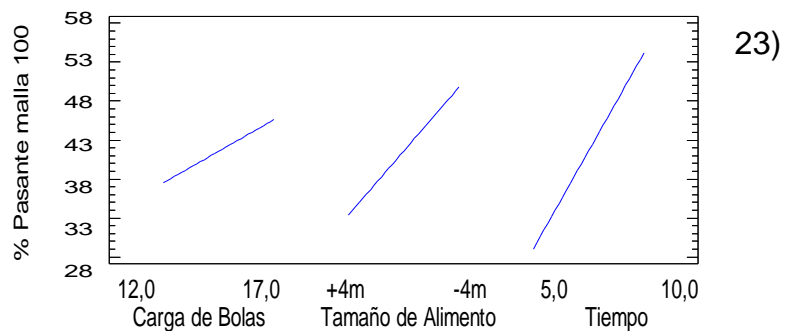
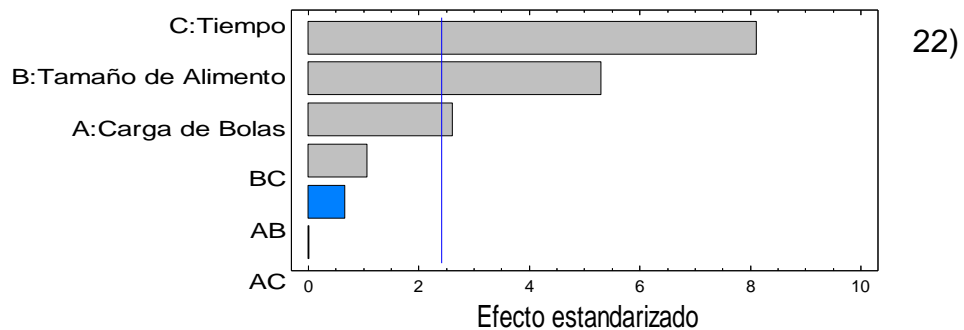
En las pruebas experimentales la variable respuesta es el porcentaje en peso pasante malla 100 con respecto a las diferentes variables (carga de bolas, tiempo de retención en el molino y tamaño de alimento, el cual fue determinado de acuerdo a la distribución granulométrica presente en estas muestras). Estas pruebas fueron realizadas a cada una de las muestras de mineral calcáreo pertenecientes al distrito minero Los Santos con la finalidad de identificar las variables operativas más influyentes durante el proceso de molienda y el valor más adecuado de las mismas. Estos resultados se observan en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de las pruebas experimentales para las tres muestras de mineral calcáreo. Fuente: Autores.

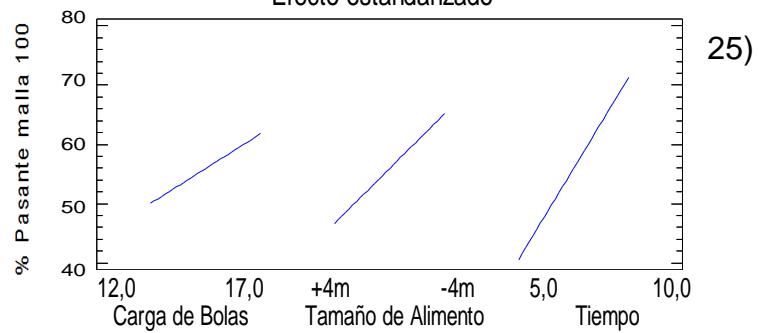
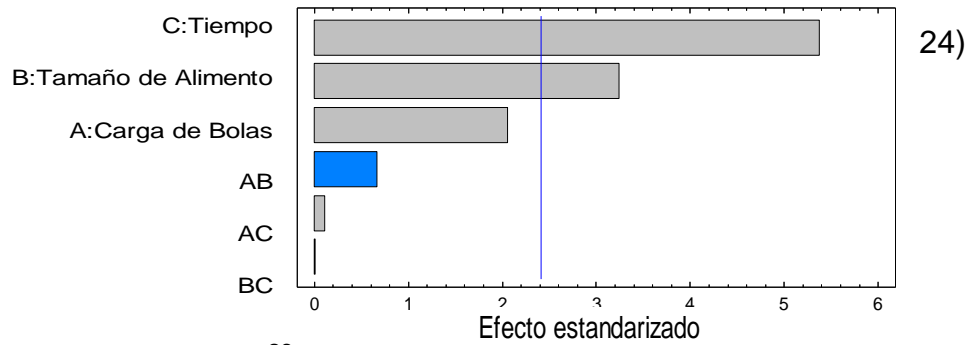
PRUEBA	Zapatoca	Curití	Los Santos
	%-100m	%-100m	%-100m
1	39,239	35,920	25,938
2	28,824	26,685	18,907
3	53,656	56,311	40,117
4	41,294	43,240	30,993
5	66,543	73,006	50,955
6	54,687	51,034	37,635
7	76,998	82,112	65,542
8	71,934	79,199	62,550

Con el programa estadístico, se obtuvo los siguientes diagramas de Pareto estandarizado y la gráfica de los efectos principales para el porcentaje en peso pasante malla 100, para cada una de las muestras correspondientes a los municipios de Curití, Zapatoca y los Santos.

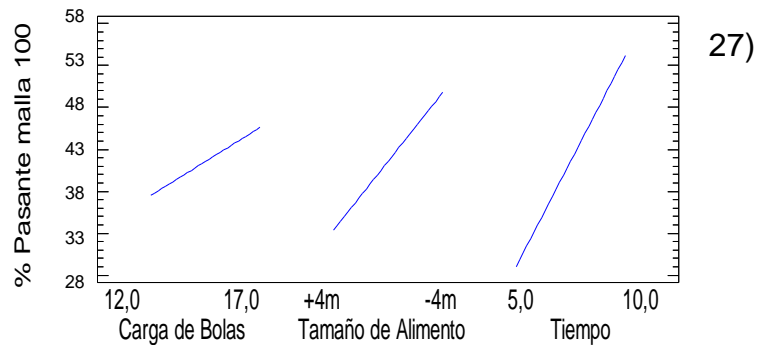
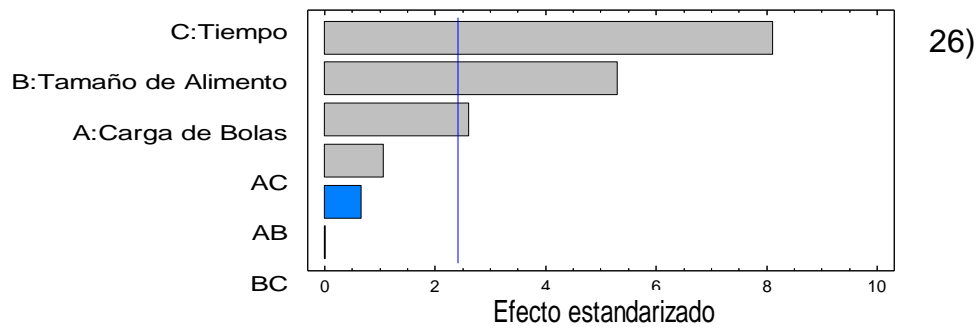
Figuras 22 y 23 Diagrama de Pareto Estandarizado para % Pasante malla 100. Mineral y Diagrama Efectos principales Mineral: Los Santos. Fuente: Autores.



Figuras 24y 25. Diagrama de Pareto Estandarizado para % Pasante malla 100 y Diagrama Efectos principales Mineral: Curití. Fuente: Autores.



Figuras 26 y 27. Diagrama de Pareto Estandarizado para % Pasante malla 100 y Diagrama Efectos principales. Mineral: Zapatoaca. Fuente: Autores.



Los diagramas de Pareto muestran de forma descendente la importancia de las diferentes variables contempladas en los cálculos y a su vez la combinación de estas variables entre sí. Por medio de una línea de color azul se determina que efectos son estadísticamente significativos dependiendo del nivel de significancia usada en el gráfico (Para el análisis se usó una significancia del 25%).

En todos los diagramas se observa que la variable más influyente es el tiempo de retención en el molino; de forma descendente se encuentran el tamaño del alimento y la carga de bolas respectivamente; esta última se presenta estadísticamente significativa para los minerales de Los Santos y Zapatoca, pero para el mineral de Curití es estadísticamente poco significativa. Por otra parte las combinaciones entre las variables pueden ocurrir, como el tiempo con las diferentes variables; BC hace referencia a la interacción entre el tiempo que es la variable C y el tamaño del alimento que es B. Del mismo modo con las demás interacciones BC y AB, que son respectivamente tamaño de alimento/tiempo y carga de bolas/tamaño de alimento.

Las interacciones en cada mineral cambian su grado de significancia debido a que según los resultados obtenidos, son más influyentes en unos que en otros, como lo observado en el diagrama de Pareto de Los Santos y Zapatoca; para éste último, la interacción entre el tiempo y la carga de bolas es más significativa que para Los Santos. De forma inversa influye la interacción BC que es más influyente para el mineral de Los Santos que para Zapatoca y Curití. Esto no quiere decir que dichas interacciones de las variables, sean significativas en la etapa de molienda según el programa.

Por otra parte se puede observar mediante los gráficos de interacción, la variación del porcentaje en peso pasante malla 100 al modificar dos variables en dos intervalos, como se ilustra en las figuras 28, 29 y 30 para cada una de las tres muestras; entre el tiempo y carga de bolas no hay interacción significativa debido a que no se cruzan.

Figura 28. Diagrama Interacción Tiempo y Carga de bolas. Mineral: Los Santos.

Fuente: Autores.

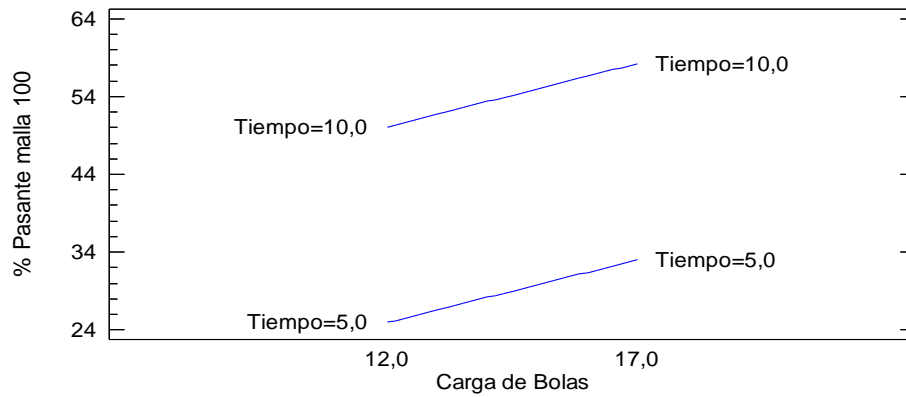


Figura 29. Diagrama Interacción entre Tiempo y Carga de bolas. Mineral: Curití.

Fuente: Autores.

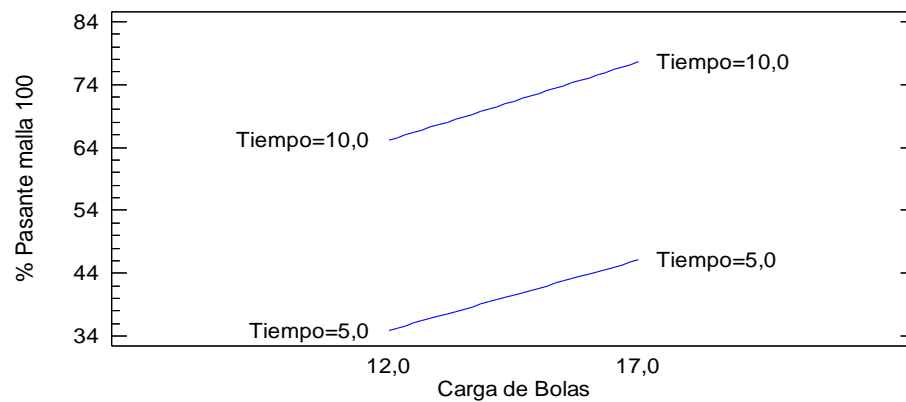
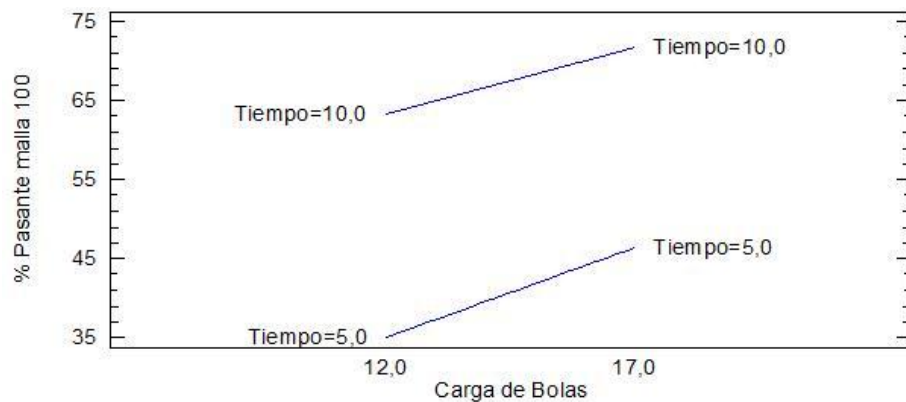


Figura 30. Diagrama Interacción Tiempo y Carga de bolas. Mineral: Zapatoaca.

Fuente: Autores.

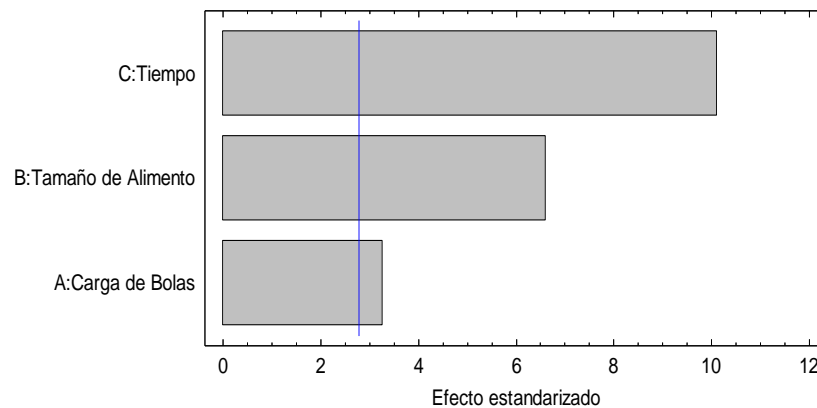


En estas gráficas de interacción entre el tiempo y la carga de bolas se puede observar como es el comportamiento de estas dos variables con respecto al % pasante malla 100; para cada una de las muestras se observa un comportamiento ascendente tanto al variar la carga de bolas como el tiempo, pero este último es predominante por tener un mayor efecto en la etapa de molienda.

Con la finalidad de determinar una ecuación representativa de la etapa de molienda, es necesario eliminar los efectos no significativos estadísticamente de cada diagrama de Pareto para cada una de las muestras.

Figura 31. Diagrama de Pareto después de eliminar efectos. Mineral: Los Santos.

Fuente: Autores.



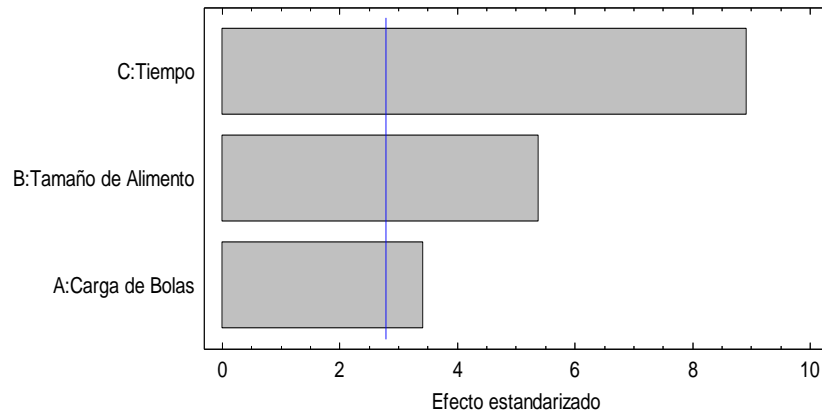
La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned}
 & \% \text{ Pasante malla } 100 \\
 & = -19,7324 + 1,62338 * \text{Carga de Bolas} + 8,22085 \\
 & \quad * \text{Tamaño de Alimento} + 5,03642 * \text{Tiempo}
 \end{aligned}$$

Los valores de las variables se encuentran especificados en sus unidades originales, excepto para los factores categóricos (tamaño de alimento) que toman valores de -1 para el nivel bajo (+4m) y +1 para el nivel alto (-4m).

Figura 32. Diagrama de Pareto después de eliminar efectos. Mineral: Curití.

Fuente: Autores.

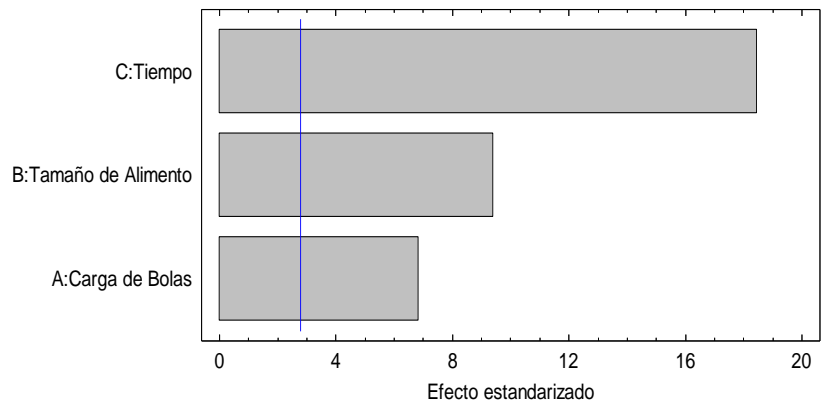


La ecuación del modelo ajustado es

$$\begin{aligned} & \% \text{ Pasante malla } 100 \\ & = -24,4738 + 2,3596 * \text{Carga de Bolas} + 9,27718 \\ & \quad * \text{Tamaño de Alimento} + 6,15973 * \text{Tiempo} \end{aligned}$$

Figura 33. Diagrama de Pareto después de eliminar efectos. Mineral: Zapatoca.

Fuente: Autores.



La ecuación del modelo ajustado es

$$\begin{aligned} & \% \text{ Pasante malla } 100 \\ & = -14,8141 + 1,98484 * \text{Carga de Bolas} + 6,82372 \\ & \quad * \text{Tamaño de Alimento} + 5,35747 * \text{Tiempo} \end{aligned}$$

Para dar un mejor entendimiento del comportamiento de la forma en que se pueden manejar las diferentes variables; se toma el tiempo constante en 7,5 min el cual equivale al tiempo medio del intervalo tomado en el estudio, este comportamiento se representa en los siguientes gráficos de superficie de respuesta con contornos abajo.

Figura 34. Diagrama de Superficie de respuesta con contornos abajo. Los Santos.

Fuente: Autores.

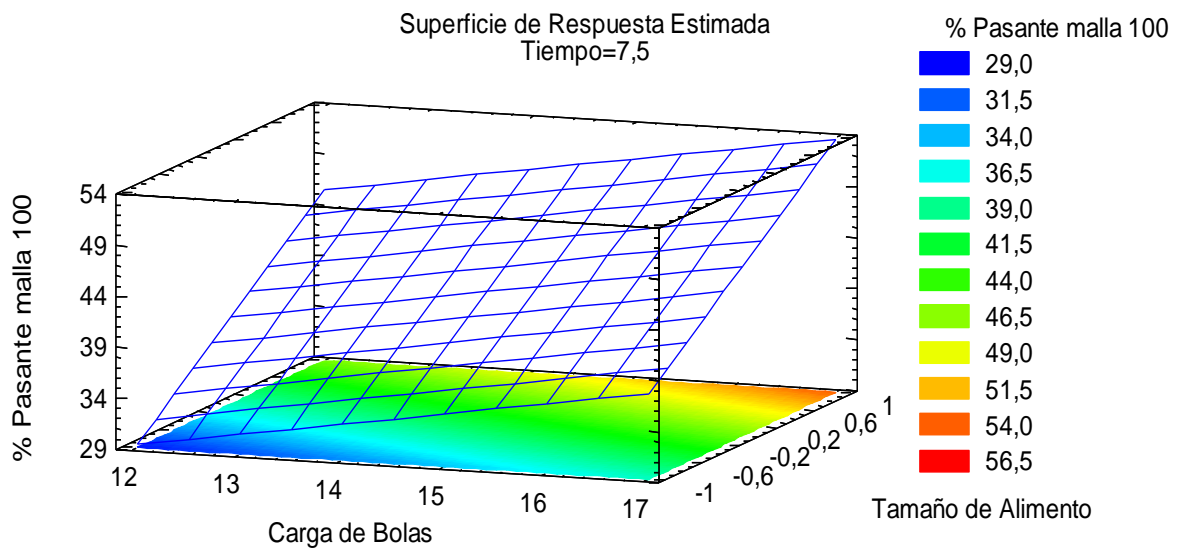


Figura 35. Diagrama de Superficie de respuesta con contornos abajo. Curití.

Fuente: Autores.

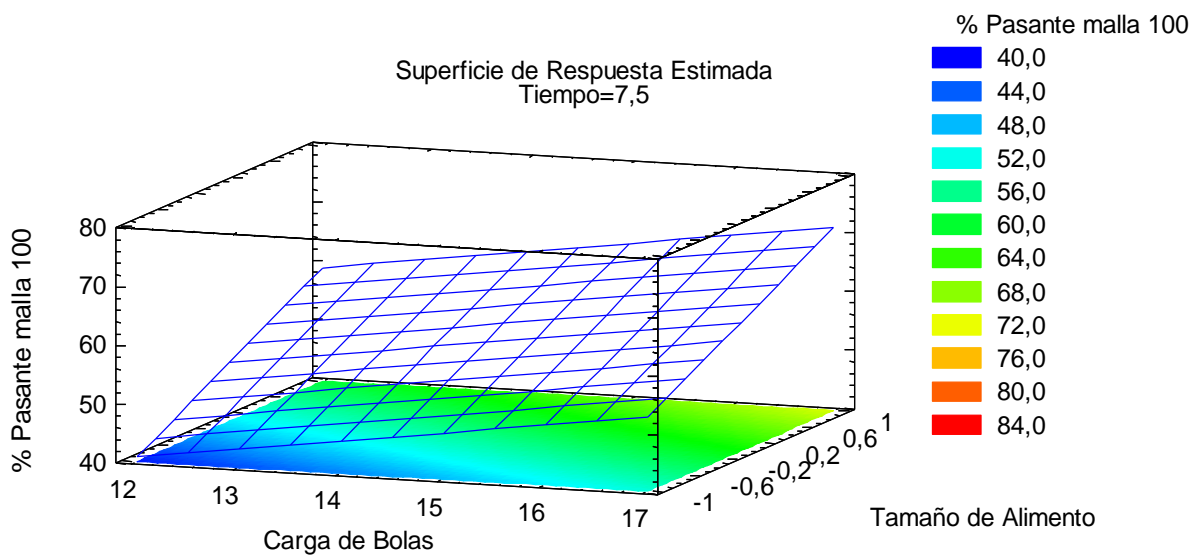
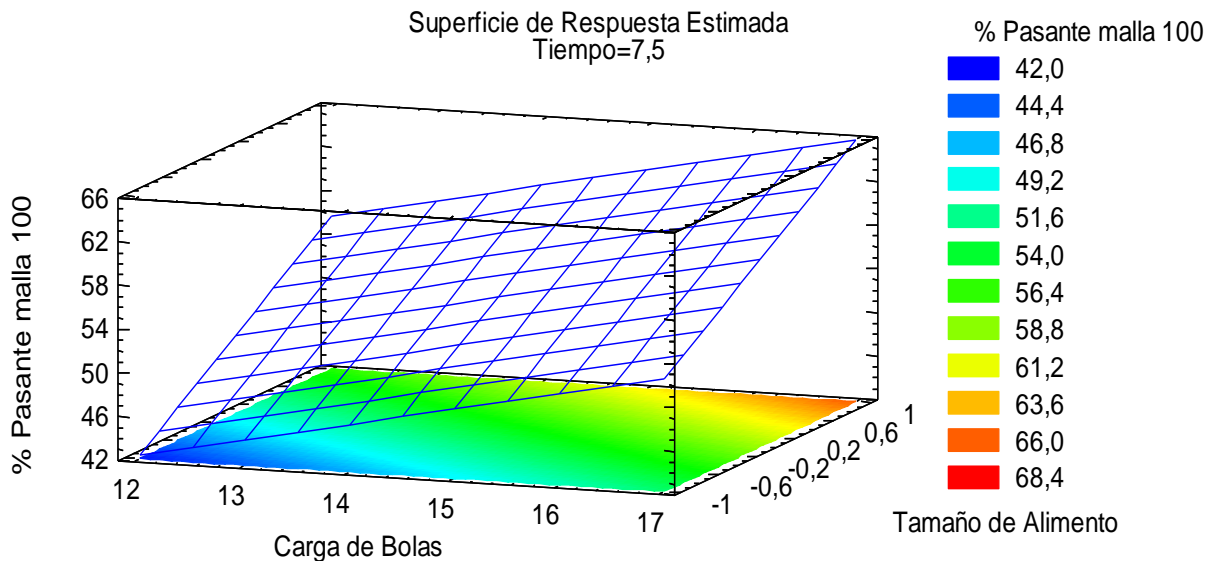


Figura 36. Diagrama de Superficie de respuesta con contornos abajo. Zapatoca.

Fuente: Autores.



Las gráficas anteriores muestran el modelo ajustado donde el valor de 1 en el eje “z”, hace referencia al tamaño de alimento menor a la malla 4m y el -1 lo inverso. La tabla 15 muestra la combinación del nivel con los factores, la cual maximiza el porcentaje pasante malla 100m sobre la región indicada; para estos gráficos las tonalidades mas cálidas indican un valor superior de la variable respuesta (%-100m) y los colores menos cálidos como el azul el valor mas bajo.

Mediante el uso del programa estadístico se determinó que con una carga de bolas del 17%, un tamaño de alimento con granulometría menor a la malla 4m y un tiempo de 10 minutos para las tres muestras de mineral calcáreo de los diferentes municipios del distrito minero los Santos, se obtienen los máximos valores para la variable respuesta del porcentaje peso pasante la malla 100m (ASTM D422). Por otra parte se observa que la variable más influyente del proceso de molienda es el tiempo de retención en el molino seguido del tamaño del mineral y por último la carga de bolas. En la tabla 15 se encuentran los resultados obtenidos mas favorables para este proceso.

Tabla 15. Valores óptimos de las variables para el máximo porcentaje pasante 100m. Fuente: Autores.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo	Valor Optimo % -100m		
				Los Santos	Curití	Zapatoca
Carga de Bolas	12,0	17,0	17,0	66,4501	86,5139	79,3266
Tamaño de Alimento	+4m	-4m	-4m			
Tiempo	5,0	10,0	10,0			

En la tabla 15 se observan los datos de las variables en las cuales se determina un valor optimo bajo estos valores de carga de bolas, tamaño de alimento y tiempo de retención en el molino; donde se afirma que bajo las mismas condiciones con relación a las variables, el mineral de Curití es el que menos ofrece resistencia a la reducción de tamaño con relación a los otros dos minerales que se manifiestan de forma ascendente a esta resistencia (Zapatoca y los Santos respectivamente); este ultimo con el menor porcentaje -100m.

Cabe mencionar que no se desea encontrar el tiempo en el cual todo el mineral es pasante por la malla 100m, debido a que como se observa en las figuras 19, 20 y 21, llega un tiempo en el cual la curva se estabiliza y el aumento de mineral pasante por la malla 100 tiende a ser mínimo; es decir, después de este tiempo existe un consumo de energía “muerto” debido a que la cantidad de mineral obtenido es mínimo.

5.5 CALCINACIÓN

Para realizar el proceso de calcinación para cada muestra de mineral, se consideró el efecto de la granulometría y el tiempo de retención en el horno sobre el porcentaje de pérdida en peso. Los resultados obtenidos fueron graficados

como se presenta en las figuras 37 y 38, para los minerales de Curití y Los Santos respectivamente. El mineral proveniente del municipio Zapatoca no fue tenido en cuenta para la calcinación debido a que su composición principal (yeso y anhidrita) requiere de un procesamiento diferente.

El efecto de la temperatura sobre el proceso de calcinación es una de las variables más importantes a considerar y la cual presenta diferentes comportamientos para cada municipio en donde fueron tomadas las muestras. En el caso del mineral de Curití, se observa que para lograr un proceso de calcinación adecuado se requiere de una pérdida en peso superior al 40%, la cual se consigue en un tiempo aproximado de 50 minutos para una temperatura de 1000°C, mientras que para 1100°C y 1200 °C solo es necesario un tiempo de exposición aproximado de 20 y 10 minutos respectivamente.

El mineral perteneciente al municipio Los Santos, presenta un comportamiento similar, en el cual para conseguir un porcentaje de pérdida en peso cercano al 40% es necesario un tiempo de 40 a 50 minutos con una temperatura de 1000°C, mientras que para 1100°C y 1200°C solo se requiere un tiempo de 20 a 30 minutos, con el cual se consigue una pérdida en peso análoga.

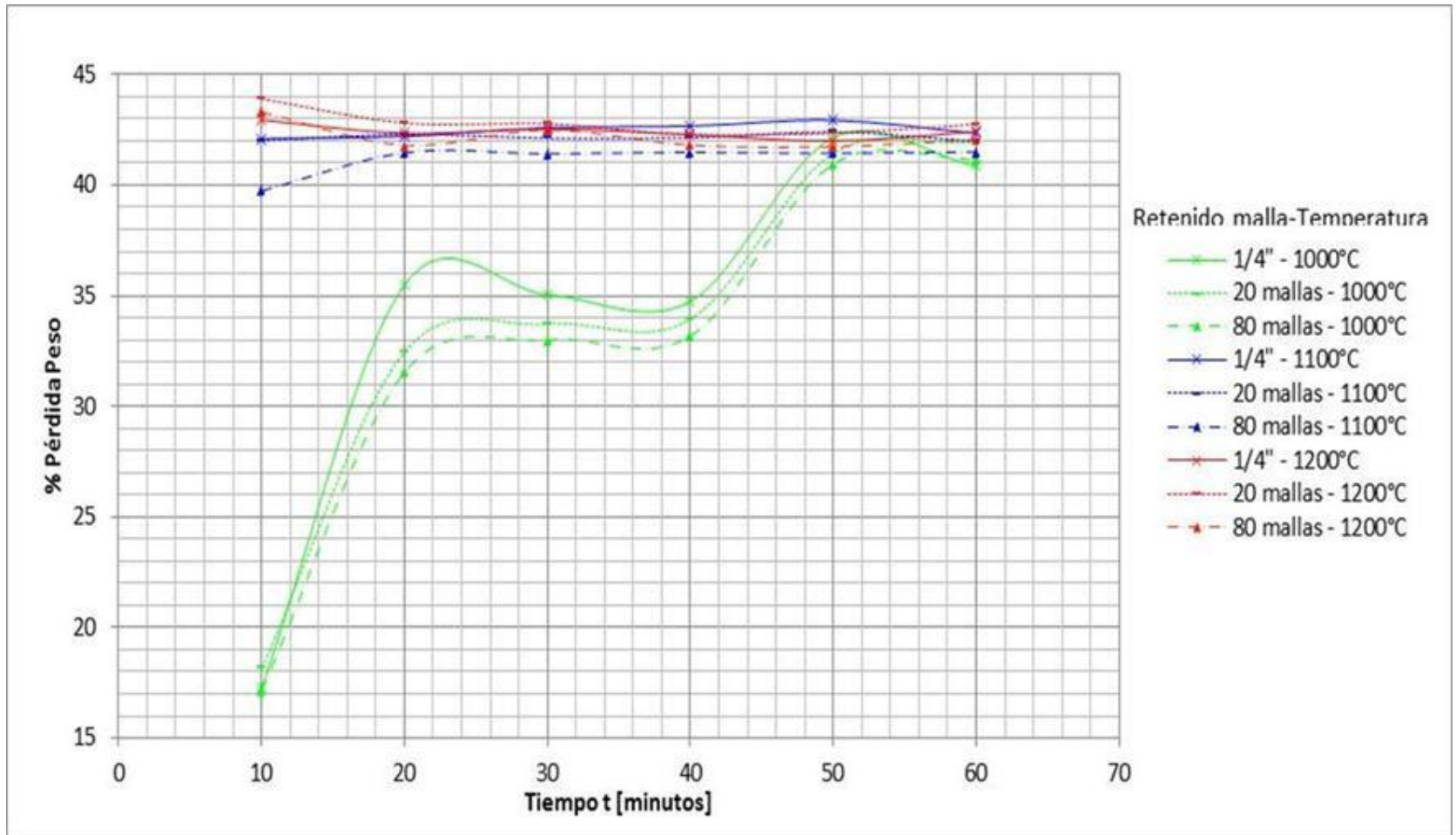
La temperatura es la variable que tiene mas influencia sobre el tiempo de calcinación, es decir como se presentó en los resultados un aumento de 100°C en la temperatura (de 1000 a 1100°C) disminuye en alrededor de 40 minutos el tiempo de calcinación.

Al considerar el efecto del tamaño sobre la pérdida en peso, es importante mencionar que el efecto es diferente para cada temperatura. Para temperaturas de 1000°C en cada una de las muestras de los municipios en estudio, se logró observar que tamaños más finos como 80 mallas, presentan menores porcentajes de pérdida en peso ya que para calcinación de un lecho fijo, las partículas al ser

mas pequeñas están mas cerca unas de otras, con espacios mas reducidos por donde puede fluir el calor para calcinar el mineral que se encuentra en la parte inferior del crisol. Caso contrario ocurre para tamaños mayores como es el caso de $\frac{1}{4}$ " en donde el calor fluye libremente alrededor de las partículas y logra un calentamiento más homogéneo a lo largo del crisol y la pérdida en peso es más efectiva.

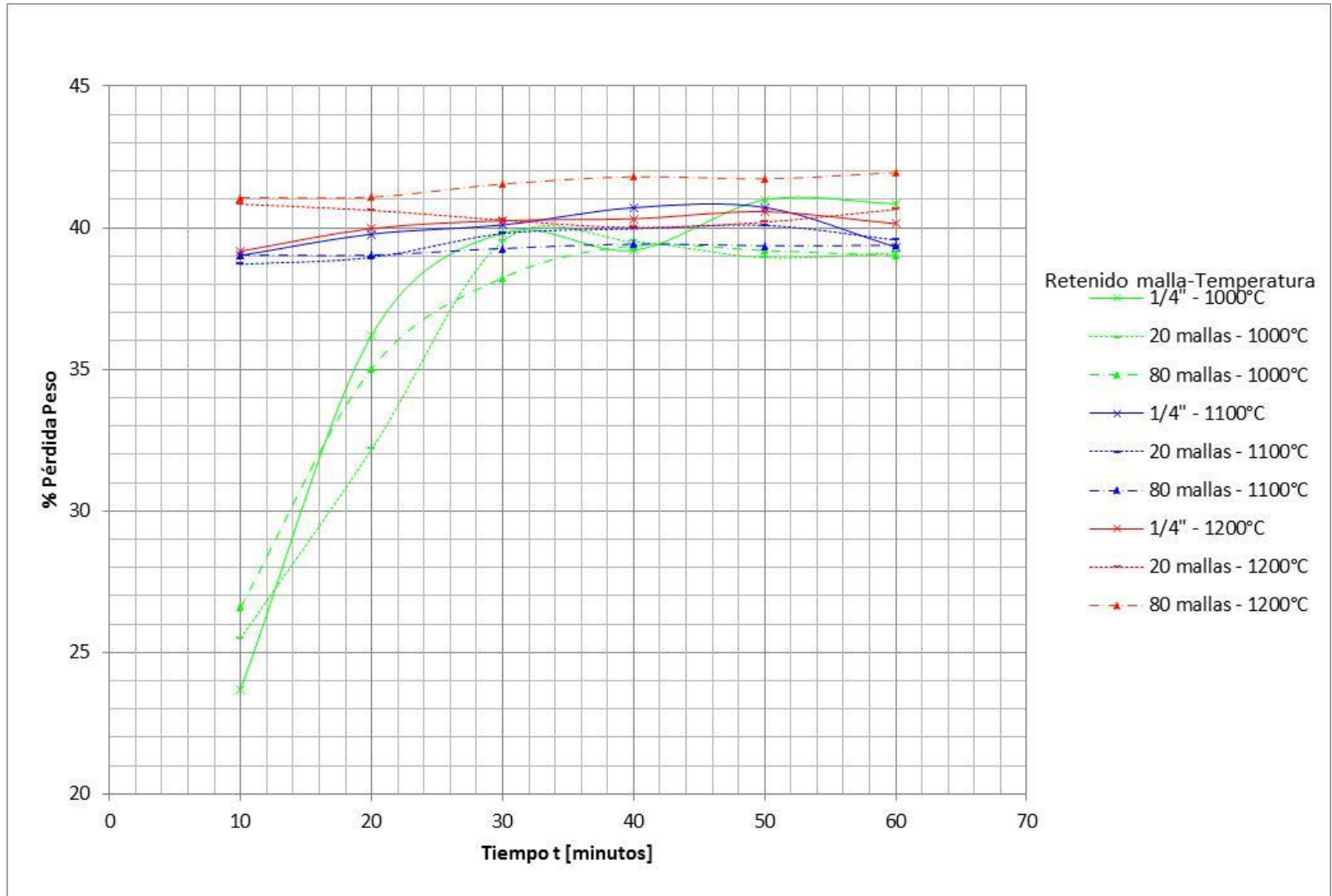
Para temperaturas mas elevadas como 1100°C y 1200°C, se presenta mayores porcentajes de pérdida en peso para tamaños menores (80 mallas), ya que el calentamiento posee la temperatura necesaria para penetrar por los espacios reducidos entre las partículas y calcinar homogéneamente el mineral dentro del crisol; además que al disminuir el tamaño de las partículas aumenta el área total expuesta por lo que la tendencia a presentar un índice de pérdida en peso es mayor. Para los municipios de Curití y Los Santos, a altas temperaturas (1100°C y 1200°C) se presenta muy poca variación del porcentaje de pérdida en peso variando el tamaño del mineral.

Figura 37. Verificación del porcentaje de pérdida en peso en función del tiempo. Mineral: Curití.



Fuente: Autores

Figura 38. Variación del porcentaje de pérdida en peso en función del tiempo: Los Santos. Fuente: Autores.



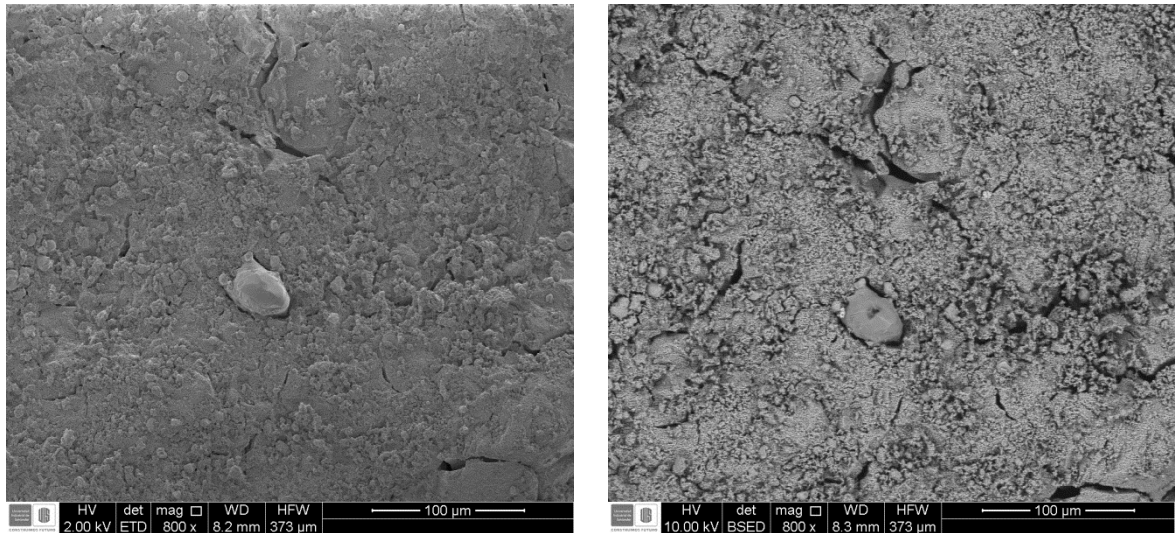
5.5.1 análisis de morfología usando SEM y EDS. Se realizó un análisis morfológico utilizando microscopía electrónica de barrido SEM y espectrómetro de dispersión de energía EDS para evaluar la distribución de la porosidad y la composición en determinados puntos de la muestra observada. Las muestras seleccionadas para realizar los análisis se presentan en la tabla 15.

Tabla 16. Muestras seleccionadas para la realización de SEM. Fuente: Autores.

Mineral	Temperatura de Calcinación (°C)	Tiempo de Calcinación (min)
Los Santos	1100	20
Curití	1100	20
Curití	1000	50

Las imágenes obtenidas para cada muestra se presentan a continuación:

Figura 39. Imágenes SEM a 800X correspondiente al mineral de Curití, calcinado a 1100°C durante 20 minutos (a) con SE (electrones secundarios) y (b) con BSE (electrones retrodispersos). Fuente: Autores.



(a)

(b)

Figura 40. Imágenes SEM a 800X correspondiente al mineral Los Santos, calcinado a 1100°C durante 20 minutos (a) con SE y (b) con BSE.

Fuente: Autores.

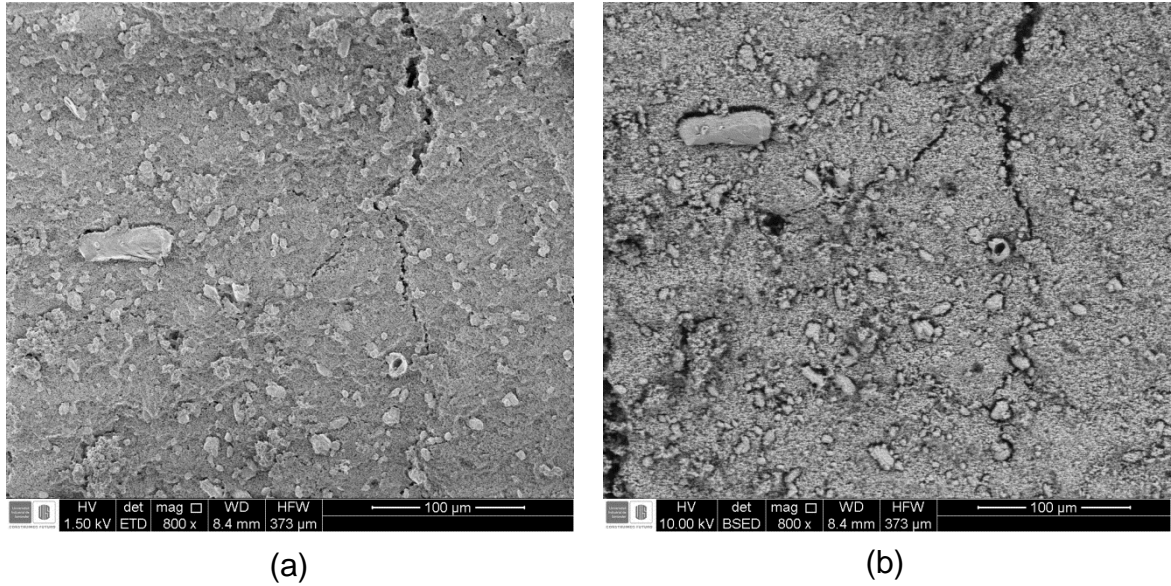
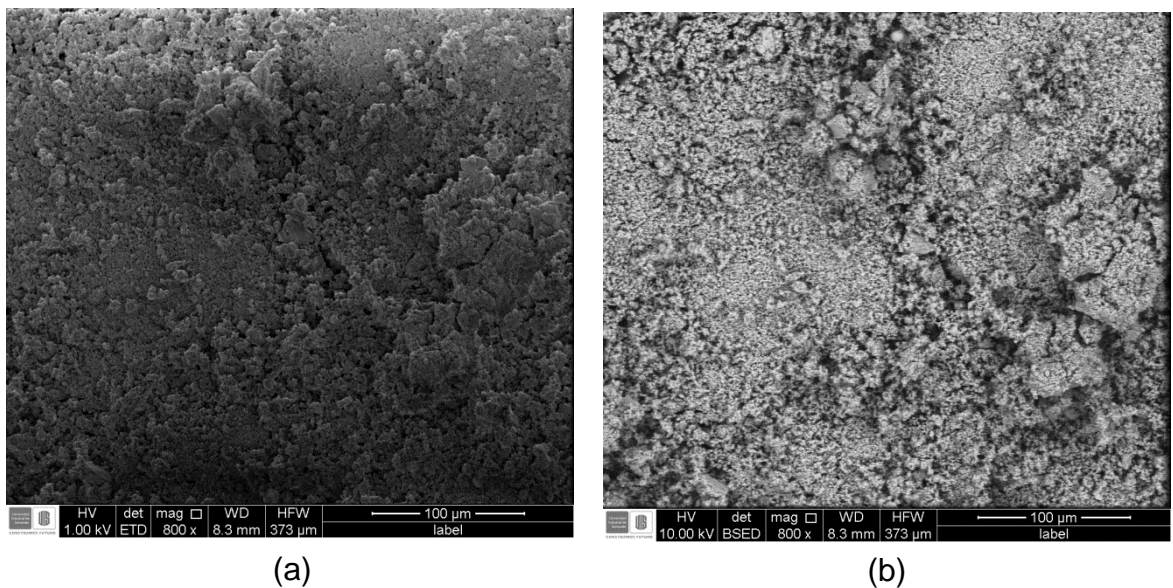
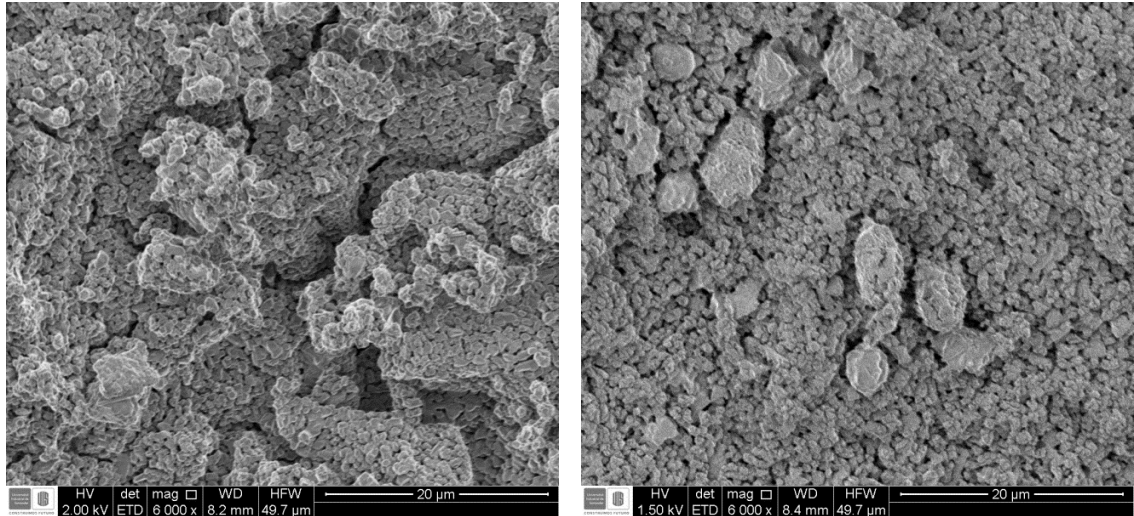


Figura 41. Imágenes SEM a 800X correspondientes al mineral de Curití, calcinado a 1000°C durante 50 minutos (a) con SE y (b) con BSE. Fuente: Autores.



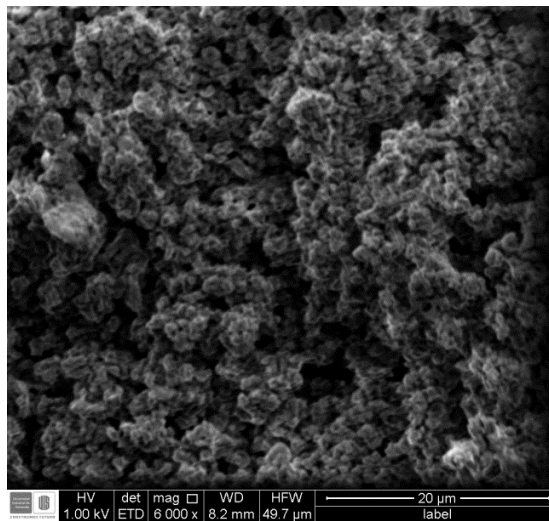
Para observar mejor la distribución de la porosidad en cada una de las muestras, fue necesario llevar las muestras a un aumento de 6000X, como se presenta en la figura 42.

Figura 42. Imágenes SEM a 6000X del mineral (a) Curití calcinado durante 20 minutos a 1100°C, (b) Los Santos calcinado durante 20 minutos a 1100°C y (c) Curití calcinado durante 50 minutos a 1000°C. Fuente: Autores.



(a)

(b)



(c)

Como se observa en la figura 42 (a) y (b), las muestras calcinadas a 1100°C presentan una mayor sinterización de los poros en la superficie del mineral, caso que no ocurre durante la calcinación a 1000°C en la cual se obtiene una porosidad adecuada constituida por gran número de cavidades que para procesos exigentes que requieren de una alta reactividad de la cal. Por lo tanto no se desea aumentar la temperatura de calcinación (1100°C) ya que las propiedades superficiales de la

cal no serían adecuadas para procesos posteriores y los tiempos de calcinación no difieren mucho de los realizados a 1100°C.

Al comparar los minerales de Curití y Los Santos calcinados a 1100°C durante 20 minutos, se puede observar que el mineral correspondiente al municipio de Curití presenta una superficie mas rugosa con mayor número de cavidades (ver figura 42a) mientras que caso contrario se observa en el mineral de Los Santos el cual presenta una superficie mas lisa como se observa en la figura 42b.

En el Anexo C, se observa con mayor alcance que la morfología de la cal obtenida por calcinación a 1000 ° C visualizada a 15000 aumentos es muy buena, pero los tiempos de calcinación son relativamente largos, mientras que al aumentar la temperatura el proceso es mas eficiente (se realiza en un menor tiempo) pero esta propiedad decrece considerablemente para minerales calcinados a 1100°C

Como se realizó análisis morfológico con electrones retrodispersos en cada una de las muestras, ninguna de ellas presentó un cambio del contraste representativo para denotar un cambio en la composición. Pero en la figura 39 se observa un cristal y a su vez en la imagen realizada con BSE muestra de color mas claro estos cristales los cuales son analizados con EDS.

Figura 43. Imagen SEM 1500X con espectrograma del punto de análisis para el mineral de Curití calcinado durante 20 minutos a 1100°C. Fuente: Autores.

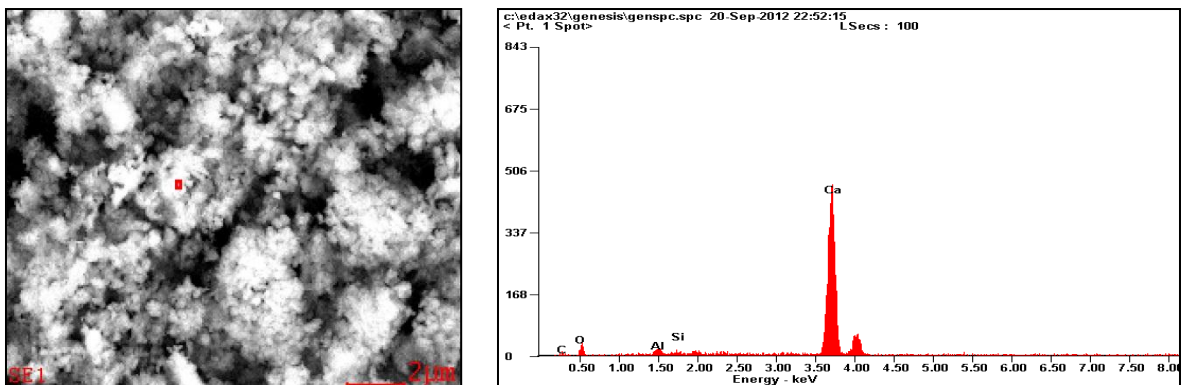


Figura 44. Imagen SEM 800X con espectrograma del punto de análisis del mineral de Curití calcinado durante 50 min a 1000°C. Fuente: Autores.

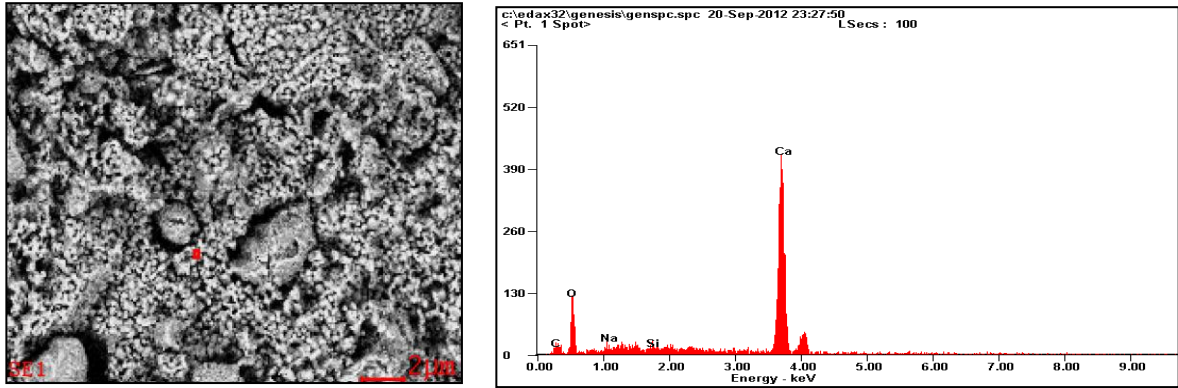


Figura 45. Imagen SEM 800X con espectrograma del punto de análisis para el mineral de Los Santos calcinado durante 20 minutos a 1100°C. Fuente: Autores.

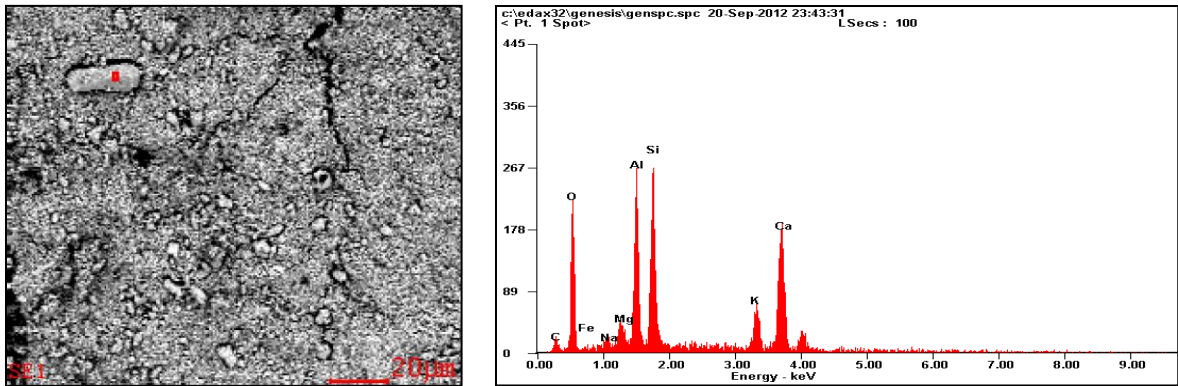
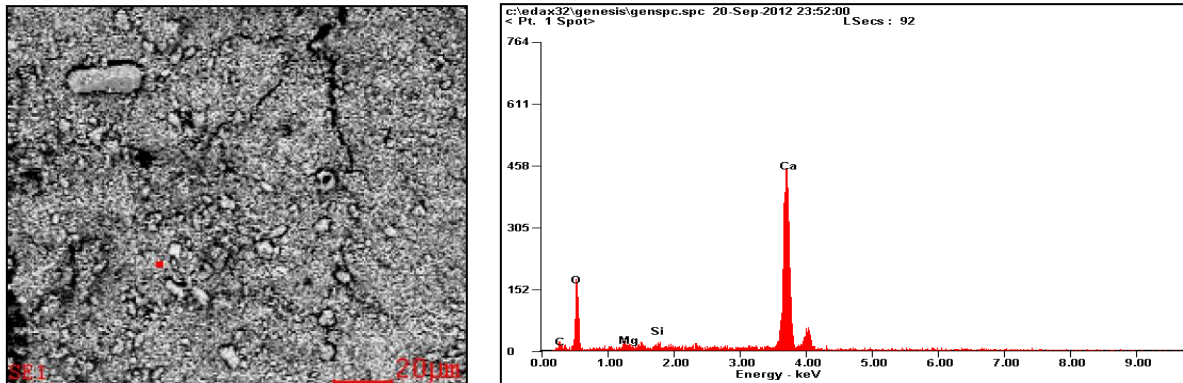


Figura 46. Imagen SEM 800X con espectrograma del punto de análisis del mineral Los Santos calcinado durante 20 minutos a 1100°C. Fuente: Autores.



En general los análisis puntuales de EDS arrojaron los resultados esperados que la mayoría del producto de la calcinación es la cal viva compuesta por Ca y O donde en cada uno de los diferentes espectrogramas se muestra que son los mas acertados en este análisis puntual. Pero en la figura 45 realizada a un cristal extraño en la matriz de CaO muestra una composición alta de Si y Al en el análisis de EDX de un compuesto que no se reaccionó durante el proceso de calcinación a la temperatura de 1100°C.

5.5.2 Análisis de CaO para los minerales calcinados. Para evaluar la eficiencia del proceso de calcinación, fueron realizadas pruebas de análisis químico para determinar el porcentaje de CaO total en las muestras calcinadas bajo el numeral 16 de la norma ASTM C25 [15]. Los análisis fueron realizados a los puntos significativos de las curvas obtenidas en las figuras 37 y 38 en los cuales se logró conseguir un porcentaje de pérdida en peso estable, es decir se logró calcinación total bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempo. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 16.

Tabla 17. Porcentaje de CaO total en las diferentes muestras de mineral antes y después del proceso de calcinación. Fuente: Autores.

MINERAL	CONTENIDO DE ÓXIDO DE CÁLCIO % CaO TOTAL		
	CaO inicial	CaO Final	Diferencia
Curití 1100 °C 20 min	57,628	95,606	37,978
Curití 1000 °C 50 min	57,628	96,083	38,455
Los Santos 1100 °C 20 min	41,885	72,674	30,789

Según los resultados que se presentan en la tabla 16 se puede decir que la relación de tiempo y temperatura para el proceso de calcinación escogida fue apropiada, y en la cuál se obtuvo un porcentaje de pureza muy alto para la cal perteneciente al municipio de Curití, constituida principalmente de óxido de calcio

y en una muy baja proporción por sílice y óxido de hierro como se presentó según el análisis de caracterización mediante difracción de rayos x que se presentan en la Figura 10 y la tabla 2.

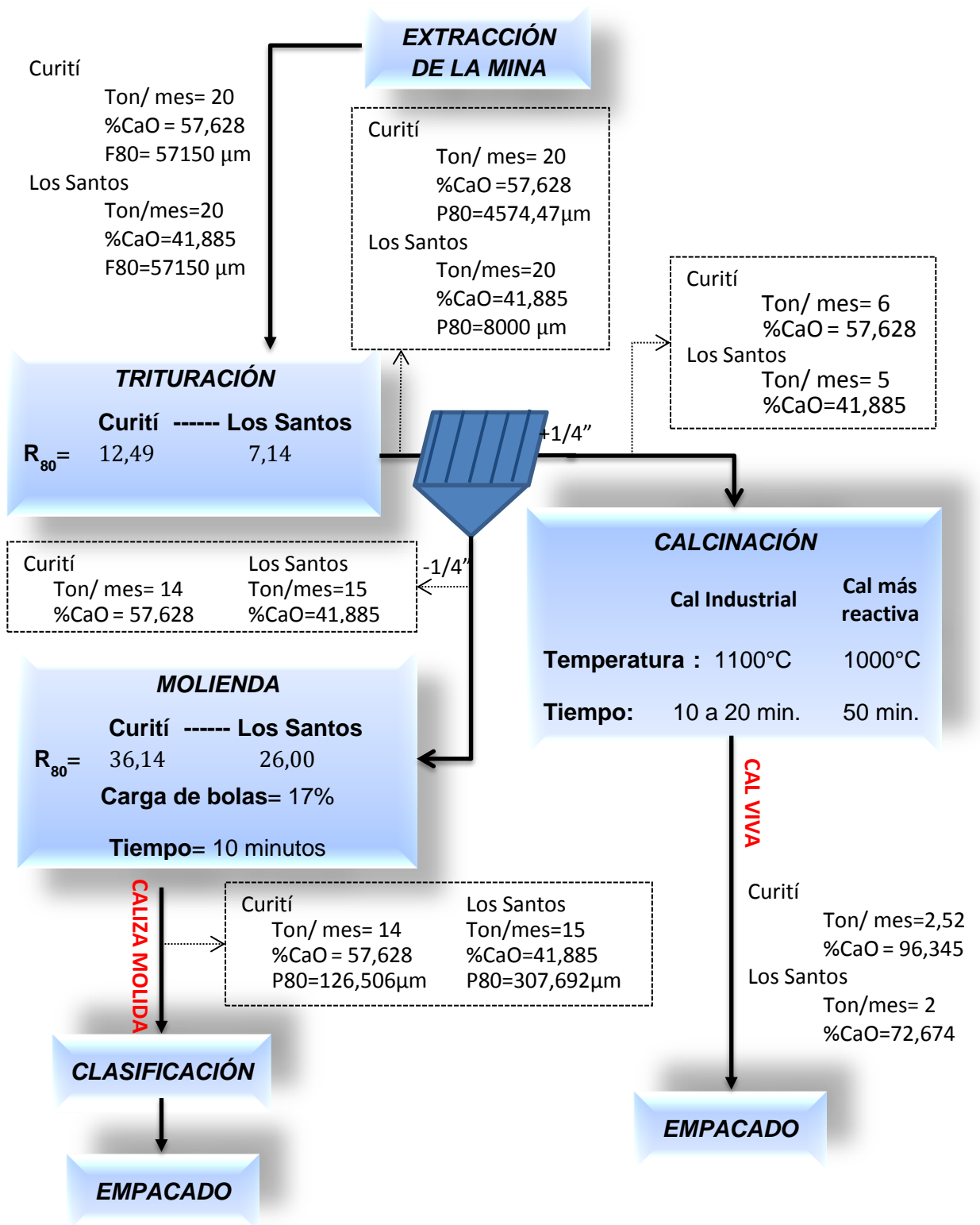
La cal correspondiente al municipio de Los Santos presenta de igual forma una alta pureza pero en menor medida a la proveniente del municipio de Curití, debido al mayor contenido de sílice y yeso presentes en yacimiento del municipio Los Santos, como se puede observar en el respectivo análisis de difracción de rayos x que se presenta en la figura 11 y tabla 3.

5.6 PROPUESTA DE UN FLUJOGRAMA PARA EL BENEFICIO DE MINERALES CALCÁREOS EN EL DISTRITO MINERO LOS SANTOS.

Con base en los resultados obtenidos a partir de los análisis anteriores, fueron seleccionados los parámetros mas adecuados para llevar a cabo un proceso de beneficio para los minerales calcáreos presentes en el distrito minero Los Santos. Cabe resaltar que el mineral trabajado en el municipio de Zapatoca requiere de un procesamiento de calcinación diferente debido a que el producto comercializado es en su composición principal yeso y anhidrita.

En el flujograma propuesto que se presenta en la figura 47 se relacionan los parámetros mas adecuados que se recomiendan para llevar a cabo los procesos de molienda y calcinación de los minerales calcáreos para los municipios que conforman el distrito minero Los Santos, así como los posibles factores de beneficio que se esperan obtener en cada etapa.

Figura 47. Flujograma propuesto para el beneficio de minerales calcáreos en el distrito minero de los santos a nivel de laboratorio



CONCLUSIONES

- El esquema de obtención para cal viva a partir de mineral calcáreo proveniente del Distrito Minero Los Santos a nivel de laboratorio, incluye los procesos de trituración, cribado, molienda, calcinación y empaclado.
- El valor obtenido mas apropiado para el proceso de molienda del mineral correspondiente al municipio de Curití es el mas alto con relación al pasante malla 100, seguido del mineral de Zapatocha y los Santos. Lo que indica que bajo las mismas condiciones es más fácil su conminución. Donde los valores de porcentaje pasante la malla 100 obtenidos oscilan entre 66 - 88% dependiendo del municipio al cual corresponde el mineral, en los cuales se determinó trabajar un porcentaje de carga de bolas del 17%, el mineral menor a la malla 4m y un tiempo de 10 minutos.
- Para realizar un proceso adecuado de calcinación en lecho fijo de los minerales calcáreos pertenecientes al distrito minero Los Santos se definió trabajar tamaños de partícula de $\frac{1}{4}$ " a una temperatura de 1100°C durante un rango de tiempo entre 10 y 20 minutos, para producir cal de usos industriales. Si se requiere una cal de alta reactividad para la producción de derivados de la cal, se concluye en realizar un proceso más pausado durante 50 minutos a una temperatura de 1000°C en el cual la cal obtenida presenta una mejor distribución de la porosidad.
- Para la misma temperatura y tiempo de calcinación (1100°C durante 20 minutos) el mineral perteneciente al municipio de Los Santos presenta una superficie mas lisa equivalente a la unión de los poros en la capa superficial que la caliza proveniente del municipio de Curití, lo que le ofrece a esta

última un mejor proceso de calcinación para que el calor pueda difundir al interior de cada partícula y permita la liberación de CO₂.

- Mediante el proceso llevado cabo se logró obtener una cal con aproximadamente 72% y 96% de óxido de calcio libre para los minerales de Los Santos y Curití respectivamente. Este ultimo de mayor calidad por su más alto contenido de CaO.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de investigación paralelos con otras áreas que permitan diseñar circuitos de procesamiento de este tipo de minerales con el fin de proyectar una forma de tratar o recircular las emisiones de CO₂ producidas en la industria ya que esta es una de las principales amenazas en el crecimiento de las empresas que se dedican al procesamiento de minerales calcáreos en la región.
- Llevar a cabo estudios que permitan tener un registro actualizado de la capacidad de los yacimientos en el distrito minero Los Santos.
- Investigar y evaluar alternativas para la producción de otro tipo de productos a base de caliza y cal de un mayor valor agregado que permitan tener un mayor beneficio económico por parte de las empresas que se dedican a la comercialización y procesamiento de minerales calcáreos en el Distrito minero Los Santos.
- Capacitar de forma continua el personal a cargo de los procesos productivos para que puedan tener un conocimiento mas profundo de los procesos realizados en las plantas industriales y contribuir a su desarrollo.
- El mineral proveniente del municipio de Zapatoca contiene en su composición principal yeso y anhidrita por lo que se recomienda calcinar el mineral de forma diferente para ser comercializado como yeso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hassibi Mohamad. FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA CAL VIVA (CaO): Desde el mineral hasta el procesamiento para su uso. Chemco Systems L. P. Marzo de 2009
- [2] J.A.H. Oates. LIME AND LIMESTONE: Chemistry and technology, production and uses. Weinheim: WILEY-VCH, 1998.
- [3] Higuera Pablo. ROCAS Y YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS CARBONATADOS. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla - La Mancha, España. Documentación online disponible en: www.uclm.es/users/higuera/yymm/YM7.html
- [4] D. J. Harrison. INDUSTRIAL MINERALS LABORATORY MANUAL LIMESTONE. British Geological Survey BGS, Technical Report WG/92/99.
- [5] Guerrero H. Joaquín. ROCAS CALIZAS: FORMACIÓN, CICLO DEL CARBONATO, PROPIEDADES, APLICACIONES, DISTRIBUCIÓN Y PERSPECTIVAS EN LA MIXTECA OAXAQUEÑA. Revista: Temas de ciencia y tecnología vol. 5. Mayo - agosto 2001
- [6] Zhongxiang Chen, C. Jim Lim, John R. Grace. STUDY OF LIMESTONE PARTICLE IMPACT ATTRITION. Department of Chemical & Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. 2006.
- [7] Xuan Yao, Hai Zhang, Hairui Yang , Qing Liu, Jinwei Wang, Guangxi Yue. AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PRIMARY FRAGMENTATION AND ATTRITION OF LIMESTONES IN A FLUIDIZED BED. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.
- [8] Irfan Ar, Gül, sen Doğru. Calcination KINETICS OF HIGH PURITY LIMESTONES. Department of Chemical Engineering, Gazi University, Maltepe, Ankara, Turkey, 2000.
- [9] N. Kantiranis. Filippidis, Tsirambides, Christaras . THERMAL DECOMPOSITION STUDY OF CRYSTALLINE LIMESTONE USING P-WAVE VELOCITY. Department of Mineralogy–Petrology Economic Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece and Department of Geology, Laboratory of Engineering Geology and Hydrogeology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Greece. 2004.

- [10] Bradner D. Wheeler. ANALYSIS OF LIMESTONES AND DOLOMITES BY X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY. Materials, Testing, and Applications, ASTM STP 1356. West Conshohocken, PA. 1999.
- [11] B.R. Stanmore, P. Gilot. REVIEW—CALCINATION AND CARBONATION OF LIMESTONE DURING THERMAL CYCLING FOR CO₂ SEQUESTRATION. Laboratoire Gestion des Risques et Environnement, Mulhouse, France. 2005.
- [12] L. Cisternas, M. Montenegro y C. Urqueta. TECNOLOGÍA DE LOS PROCESOS QUÍMICOS: una revisión de los principios, mercado y medio ambiente a través de la industria química chilena. Universidad de Antofagasta 1999. Capítulo 4: Productos derivados de minerales no metálicos, Pag 51.
- [13] Rosenqvist, Terkel. PRINCIPLES OF EXTRACTIVE METALLURGY. Trondheim 2004.
- [14] Millan, Hugo. Unidad de planeación Minero Energética UPME: Plan de infraestructura de transporte y portuaria para el desarrollo minero en Colombia. Consorcio Silva Carreño y asociados S.A. 2004
- [15] ASTM C25. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime.
- [16] ASTM D422. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

ANEXOS

Anexo A. Distribución de tamaño para cada muestra de mineral previo al proceso de molienda

Malla (ASTM)	Dp (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
3/4"	19000	0	0	0	100
1/4"	6300	566,88	28,53	28,53	71,47
N°4	4750	494,59	24,89	53,42	46,58
N°10	2000	540,57	27,20	80,62	19,38
N°20	850	176,56	8,88	89,50	10,50
N°40	425	74,39	3,74	93,25	6,75
N°60	250	38,03	1,91	95,16	4,84
N°80	180	31,67	1,59	96,76	3,24
N°100	150	16,73	0,84	97,60	2,40
N°200	75	21,05	1,06	98,66	1,34
-200		26,70	1,34	100	0

Distribución de tamaños del mineral proveniente de Curití después de trituración.

Fuente: Autores.

Peso total (g)	1987,17
Peso muestra análisis (g)	2000
% error	0,64

Porcentaje de error del análisis para el mineral proveniente de Curití.

Fuente: Autores.

Malla (ASTM)	Dp (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
3/4"	19000	0	0	0	100
1/4"	6300	498,39	24,97	24,97	75,03
N°4	4750	434,15	21,75	46,73	53,27
N°10	2000	535,06	26,81	73,54	26,46
N°20	850	243,72	12,21	85,75	14,25
N°40	425	120,12	6,02	91,77	8,23
N°60	250	59,35	2,97	94,74	5,26
N°80	180	35,91	1,80	96,54	3,46
N°100	150	22,29	1,12	97,66	2,34
N°200	75	26,95	1,35	99,01	0,99
-200		19,78	0,99	100	0

Distribución de tamaños del mineral perteneciente al municipio los Santos después de trituración. Fuente: Autores.

Peso total (g)	1995,72
Peso muestra análisis (g)	2000
% error	0,214

Porcentaje de error del análisis para el mineral del mineral perteneciente al municipio Los Santos. Fuente: Autores.

Malla (ASTM)	Dp (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
3/4"	19000	0	0	0	100
1/4"	6300	381,2	19,06	19,06	80,94
N°4	4750	411,82	20,60	39,66	60,34
N°10	2000	725,34	36,27	75,93	24,07
N°20	850	219,22	10,96	86,90	13,10
N°40	425	86,43	4,32	91,22	8,78
N°60	250	43,08	2,15	93,37	6,63
N°80	180	19,61	0,98	94,35	5,65
N°100	150	12,87	0,64	95,00	5,00
N°200	75	25,18	1,26	96,26	3,74
-200		74,83	3,74	100	0

Distribución de tamaños del mineral proveniente de Zapatoca después de trituración. Fuente: Autores.

Peso total (g)	1999,58
Peso muestra análisis (g)	2000
% error	0,021

Porcentaje de error del análisis para el mineral proveniente de Zapatoca.

Fuente: Autores.

Anexo B. Distribución de tamaños del mineral posterior al proceso de molienda

Malla (ASTM)	Dp (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
N°10	2000	0,31	0,16	0,16	99,84
N°20	850	0,67	0,34	0,49	99,51
N°40	425	3,98	1,99	2,49	97,51
N°60	250	8,04	4,02	6,51	93,49
N°80	180	23,09	11,56	18,06	81,94
N°100	150	27,88	13,95	32,01	67,99
N°200	75	103,18	51,63	83,64	16,36
-200		31,97	16,00	99,64	0,36

Distribución de tamaños del mineral proveniente de Curití después de molienda con tiempo =10 min y J=17%. Fuente: Autores.

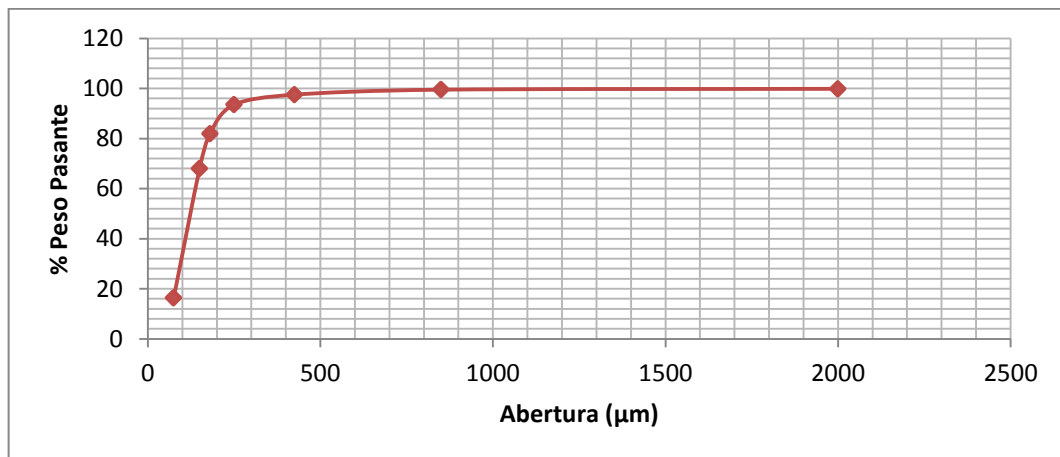
Peso total (g)	199,11
-----------------------	---------------

Peso muestra análisis (g)	200
----------------------------------	------------

% error	0,44
----------------	-------------

Porcentaje de error del análisis para el mineral proveniente de Curití.

Fuente: Autores.



Porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: Curití. Fuente: Autores.

Malla (ASTM)	Dp (µm)	Peso (g)	Peso (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)
N°10	2000	0	0	0	100
N°20	850	15,37	7,70	7,70	92,30
N°40	425	11,12	5,57	13,28	86,72
N°60	250	13,52	6,78	20,05	79,95
N°80	180	31,59	15,83	35,88	64,12
N°100	150	64,89	32,52	68,40	31,60
N°200	75	41,61	20,85	89,24	10,76
-200		21,47	10,76	100,00	0,00

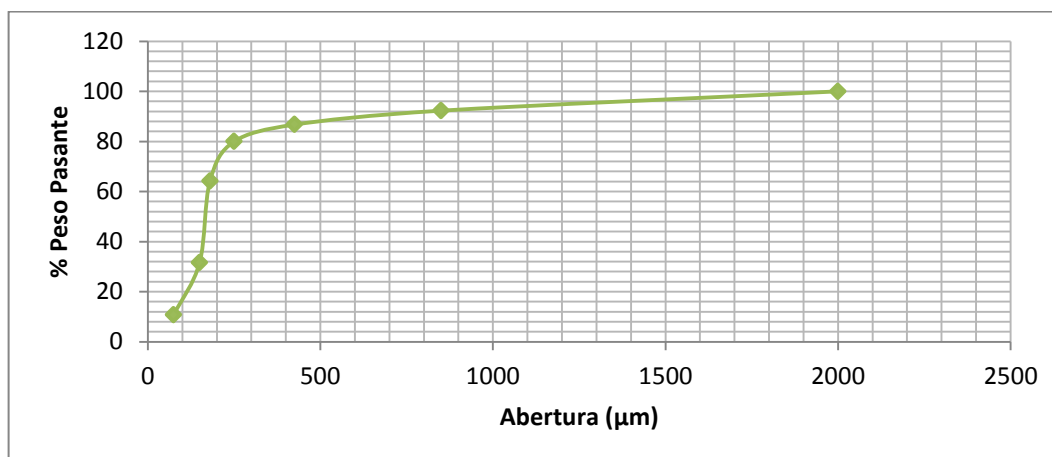
Distribución de tamaños del mineral perteneciente al municipio Los Santos después de molienda con tiempo =10 min y J=17%. Fuente: Autores.

Peso total (g)	199,57
-----------------------	---------------

Peso muestra análisis (g)	200
----------------------------------	------------

% error	0,21
----------------	-------------

Porcentaje de error del análisis para el mineral del municipio Los Santos. Fuente: Autores.



Gráfica Porcentaje en peso Vs Abertura del tamiz – Mineral: Los Santos.

Fuente: Autores.

Anexo C. Micrograffías A 6000 Y 15000 Aumentos Del Mineral Calcinado Proveniente Del Municipio De Curití

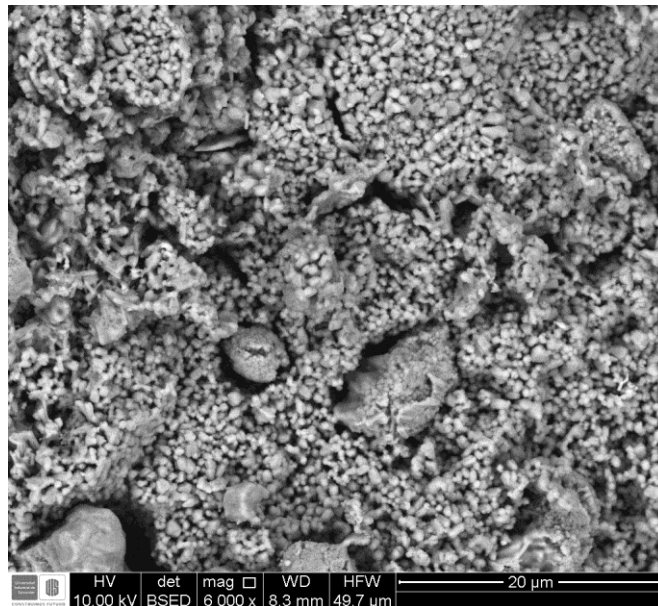


Imagen SEM a 6000X –BSE. Mineral de Curití calcinado durante 20 minutos a 1100°C. Fuente: Autores.

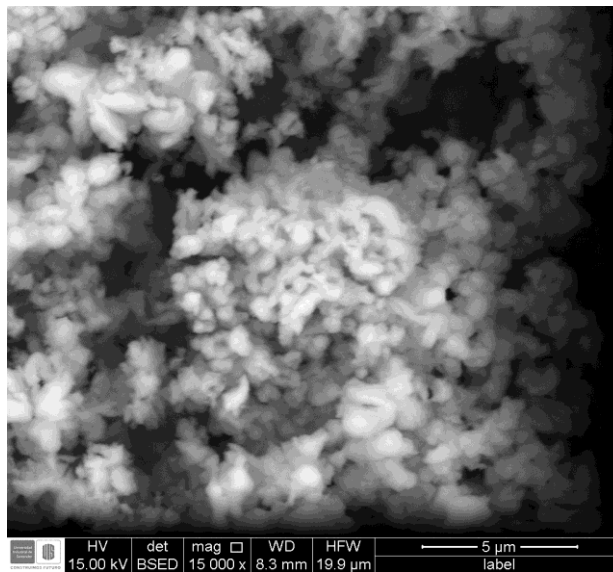


Imagen SEM a 15000X –BSE. Mineral de Curití calcinado durante 50 minutos a 1000°C. Fuente: Autores