

**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA EMPRESA CALIZAS
DE COLOMBIA MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

ARNALDO CÉSAR ALONSO SALAZAR

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

2017

**DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA EMPRESA CALIZAS
DE COLOMBIA MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**

ARNALDO CÉSAR ALONSO SALAZAR

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

DIRECTOR:

Prof. WALTER PARDAVÉ LIVIA

Ingeniero Metalúrgico, MSc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA LOS MATERIALES

BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A mis padres por la educación recibida y por ayudarme a crecer como persona

A Rocky por su amistad incondicional y verdadera.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por la formación académica recibida durante todo este tiempo.

Al director de proyecto Walter Pardavé Livia, por su constante asesoramiento para poder llevar a cabo el trabajo de grado.

A los laboratoristas Ambrosio Carrillo Carrillo y Héctor Javier Gaitán Arenas, quienes siempre se encontraron dispuestos a colaborar durante las pruebas realizadas en el proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1. ANTECEDENTES | 14 |
| 2. OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 16 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 16 |
| 3. METODOLOGÍA | 17 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 20 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN | 20 |
| 4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CALIZA Y CAL PRODUCIDA POR LA EMPRESA | 22 |
| 4.3 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA EMPRESA FABRICANTE DE CAL | 25 |
| 4.4 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL CONSUMO ELÉCTRICO | 26 |
| 4.5 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LOS VEHÍCULOS USADOS POR LA EMPRESA | 26 |
| 4.6 CANTIDAD DE CO_2 PRODUCIDO POR LA CALCINACIÓN DE LA CALIZA | 26 |
| 4.7 CANTIDAD DE CO_2 PRODUCIDO POR LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN | 27 |
| 4.8 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO TOTAL | 27 |
| 4.9 CALCINACIÓN DE LA CALIZA A DIFERENTES CONDICIONES OPERACIONALES | 28 |
| 4.10. BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE LA EMPRESA FABRICANTE DE CAL | 34 |
| 4.11 BALANCE DE ENERGÍA DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE LA EMPRESA FABRICANTE DE CAL | 34 |
| 5. CONCLUSIONES | 36 |
| 6. RECOMENDACIONES | 37 |
| REFERENCIAS | 38 |
| ANEXOS | 40 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Resultados obtenidos correspondiente a la caracterización del carbón. | 20 |
| Tabla 2. Composición química de la cal viva obtenida por la empresa. | 22 |
| Tabla 3. Composición química de la cal hidratada obtenida por la empresa. | 24 |
| Tabla 4. Composición química de la caliza usada por la empresa. | 24 |
| Tabla 5. Valores de consumo eléctrico de los equipos empleados en los procesos de elaboración de cal. | 25 |
| Tabla 6. Consumo y tipo de combustible de los vehículos utilizados en la empresa. | 25 |
| Tabla 7. Resultados obtenidos de la cantidad de CO_2 generado para cada proceso junto con la huella de carbono total de la empresa. | 28 |
| Tabla 8. Resultados obtenidos después de realizado el proceso de calcinación. | 29 |
| Tabla 9. Factor de emisión para distintos tipos de combustibles. | 45 |
| Tabla 10. Composición química de la calcinación hecha en el laboratorio a una temperatura de 1223,15 K, tiempo de 45 minutos y malla 100 pasante. | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Análisis Ciclo de vida (ACV) de una determinada empresa y la emisión de GEI que se produce. | 15 |
| Figura 2. Materia prima utilizada por la empresa. a. Muestra de piedra caliza. b. Muestra de carbón | 19 |
| Figura 3. Gráfica auxiliar para la determinación del % de CO_2 máximo. | 21 |
| Figura 4. Diagrama de Ostwald correspondiente al carbón usado por la planta industrial de la empresa fabricante de cal. | 22 |
| Figura 5. Análisis de varianza de la cantidad de CO_2 en función de la temperatura, número de malla y tiempo. | 31 |
| Figura 6. Análisis de varianza de la cantidad de CO_3^- en función de la temperatura, número de malla y tiempo. | 31 |
| Figura 7. Superficie de respuesta de la cantidad de CO_2 en función de la temperatura y número de malla con un tiempo de optimización. | 32 |
| Figura 8. Superficie de respuesta de la cantidad de CO_3^- en función de la temperatura y número de malla con un tiempo de optimización. | 32 |
| Figura 9. Balance de masa correspondiente a la planta industrial de la empresa fabricante de cal. | 34 |
| Figura 10. Diagrama de Sankey correspondiente a la planta industrial de la empresa fabricante de cal. | 35 |
| Figura 11. Comparación de los perfiles entre el obtenido después de la realización del proceso y los perfiles establecidos con la norma. | 42 |
| Figura 12. Difractograma correspondiente a la cal viva. | 43 |
| Figura 13. Difractograma correspondiente a la cal hidratada | 43 |
| Figura 14. Difractograma correspondiente a la caliza. | 44 |
| Figura 15. Microscopía electrónica de barrido (SEM) para la cal obtenida a condiciones operacionales de 950 1223,15 K, 60 minutos y tamaño de partícula -100. a. x1000 y 100 μm . b. x1000 y 50 μm . c. x4000 y 20 μm . d. x8000 y 10 μm . | 46 |
| Figura 16. Difractograma de la calcinación a 1223,15 K , 45 minutos y malla 100 pasante. | 47 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| ANEXO A. Cálculos hechos para la caracterización del carbón. | 40 |
| ANEXO B. Difractogramas correspondientes a cal viva, cal hidratada y caliza de la empresa fabricante de cal. | 43 |
| ANEXO C. Factores de emisiones para distintos tipos de combustibles. | 45 |
| ANEXO D. Micrografía correspondiente a la cal obtenida a nivel de laboratorio con las condiciones operacionales de 1223,15 K, 60 minutos y malla 100 pasante. | 46 |
| ANEXO E. Composición química y difractograma de la cal obtenida a nivel de laboratorio con condiciones operacionales de 1223,15 K, 45 minutos y malla 100 pasante. | 47 |

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA EMPRESA CALIZAS DE COLOMBIA MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA*.

AUTOR: Alonso Salazar Arnaldo César*

PALABRAS CLAVES: Huella de carbono, gases efecto invernadero, análisis de ciclo de vida.

DESCRIPCIÓN: En el presente trabajo de grado se determinó la huella de carbono de una empresa fabricante de cal ubicada en el barrio Los Colorados, mediante el análisis ciclo de vida (ACV). Para llevarlo a cabo se realizó una visita a la empresa en donde se recolectó la materia prima (carbón, piedra caliza y cal), se registró la cantidad de materia prima usada por día y se visualizaron los procesos hechos por la empresa para la fabricación de su producto. Después se caracterizó la materia prima a nivel de laboratorio y se realizó un balance de materia y energía de la planta industrial. Por las características del proceso de obtención de la cal, la etapa que requiere mayor atención está en el horno calcinador. Con los datos suministrados por la empresa y los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, el valor estimado de la huella de carbono de la empresa fabricante de cal fue de $12277,019 \text{ kg de } \frac{CO_2}{\text{día}}$ lo que viene a ser un valor aceptable dentro de los estándares ambientales. Como trabajo adicional se realizó un modelo estadístico que tuvo como objetivo mejorar las condiciones operacionales de la empresa. Con base en los resultados obtenidos, se recomienda un aumento en la temperatura del horno a aproximadamente 1223,15 K con un tiempo de 45 minutos para obtener mejor calidad de cal con una emisión prácticamente igual de CO_2 .

* Proyecto de Grado (Modalidad: Investigación)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: MSc Walter Pardavé Livia.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF CARBON FOOTPRINT OF THE COMPANY CALIZAS DE COLOMBIA BY LIFE CYCLE ASSESMENT

AUTHOR: Alonso Salazar Arnaldo César*

KEYWORDS: Carbon footprint, greenhouse gases, life cycle assessment.

DESCRIPTION: In the present project, the carbon footprint of a lime company located in the neighborhood Los Colorados was determined using the Life Cycle Assesment (LCA). For accomplish the work, a visit to the company was performed, in order to collect the raw material (coal, limestone and lime), it was registered the amount of raw material used per day and it was visualized the processes that the company do for the fabrication of their products. After the visit, we characterized the raw material at level of laboratory and calculated a mass and energy balance of the industrial plant. Cause the characteristics of the calcination process, it was exposed that the most important process and the one that require more attention occur in the calcinatory kiln. With the data supplied by the company and the results obtained at level of laboratory, the carbon footprint value was $12277,019kg \text{ de } \frac{CO_2}{day}$ and it is an acceptable value. As additional work, a statistic model was performed and has the goal of improving the conditional operations of the company because the qualities of their final products are not acceptable at all. Taking into account the results of the statistic model, it is recommended a higher level of temperature in the kiln to around 1223, 15 K with an exposure time of 45 minutes to obtain a better quality in their dolomite and also emitting almost the same CO_2 quantity.

* Degree Project (Modality: Investigation)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Director: MSc Walter Pardavé Livia

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el planeta Tierra ha experimentado un aumento paulatino de la temperatura, registrándose durante el año 2015 la cifra más elevada según los registros históricos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Una de las causas más relevantes que origina este calentamiento global es el incremento excesivo de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), tales como: dióxido de carbono (CO_2), ozono (O_3), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O). Estos gases absorben la radiación infrarroja reflejada por la superficie terrestre, irradiándola nuevamente. De esta manera, se aumenta la temperatura. Por esta razón es importante conocer la cantidad de GEI que se emiten a la atmosfera durante el desarrollo de las actividades humanas.

Industrialmente se ha implementado el método de la huella de carbono para calcularla durante un determinado proceso. Al aplicar el análisis ciclo de vida (ACV); que involucra un estudio de todas las emisiones que se generan desde la extracción de la materia prima, el transporte de la misma hasta la obtención del producto final, permite estimar la cantidad de GEI que se emiten de forma directa e indirectamente durante un determinado proceso. La fabricación de la cal caracterizada por las grandes cantidades de dióxido de carbono que producen las reacciones químicas que se llevan a cabo y el uso de combustibles fósiles como fuente de energía ocasiona una alta contaminación atmosférica.

En el presente proyecto se estableció la huella de carbono en la planta industrial de la empresa productora de cal ubicada en el barrio los Colorados, Bucaramanga Santander, mediante el análisis ciclo de vida con el propósito de determinar la magnitud de su impacto ambiental y dar posibles soluciones para mitigarlo.

1. ANTECEDENTES

El efecto invernadero es un proceso natural del planeta tierra que permite mantener un equilibrio en la temperatura media de 15°C; por esta razón existe vida. Se dice que si no existiera el efecto invernadero, la temperatura promedio de la tierra estaría en los alrededores de -18°C, imposibilitando cualquier presencia de vida.

Según estudios de Charles Keeling, el efecto invernadero ha sido alterado por actividades humanas desde el siglo XVIII, cuando se llevó a cabo la revolución industrial. Sin embargo, desde 1978 hasta la fecha, es cuando ha ocurrido el mayor aumento de la temperatura, debido a la deforestación de los bosques y al gran crecimiento de industrias tales como la ganadera, automotriz, etc. Estas industrias son las mayores responsables de que el calentamiento global sea una realidad. Una de las iniciativas más promisorias para disminuir la cantidad de GEI emitidas se llevó a cabo el protocolo de Kioto en 1997 donde se establecieron las cantidades máximas de GEI por país para poder establecer pautas que lleven a disminuir el calentamiento global.

Para cuantificar las mediciones de GEI, se dio cabida al término que hoy se conoce como huella de carbono. Según la expresión (I) para estimar la huella de carbono de una actividad industrial es [1]:

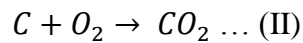
$$Kg \text{ equivalentes de } CO_2 = \text{Factor de emisión} * \text{Cantidad} \dots (I)$$

Son muchas las personas que han tratado de establecer una definición del término huella de carbono. Entre las más importantes se encuentran: la propuesta por Høgevold en el año 2003, que la define como el área ecológicamente productiva en una sociedad de consumo que se requiere para asimilar la cantidad de CO_2 emitido. En el año 2010, Peters define la huella de carbono como una medición del impacto ambiental, producido por las fuentes de emisiones relevantes que son los sitios en donde se almacena, consume y producen compuestos que tienen como base el elemento carbono. Por último, los estudios realizados por Wiedman y Minx en 2007 y Pandey en 2011 que establecieron una metodología para determinar la huella de carbono por el análisis ciclo de vida (ACV). En este análisis se

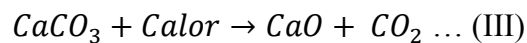
dividen las fuentes de emisiones de CO_2 en categorías para facilitar así su cuantificación. [1][2]

Otros de los aspectos importantes para la estimación de la huella de carbono en una empresa en este caso, fabricante de cal es considerar dos reacciones químicas: la combustión del carbono y la calcinación de la caliza que se expresan de la siguiente manera:

La reacción correspondiente a la combustión del carbono suponiendo que se trata de una combustión completa es: [4][5]

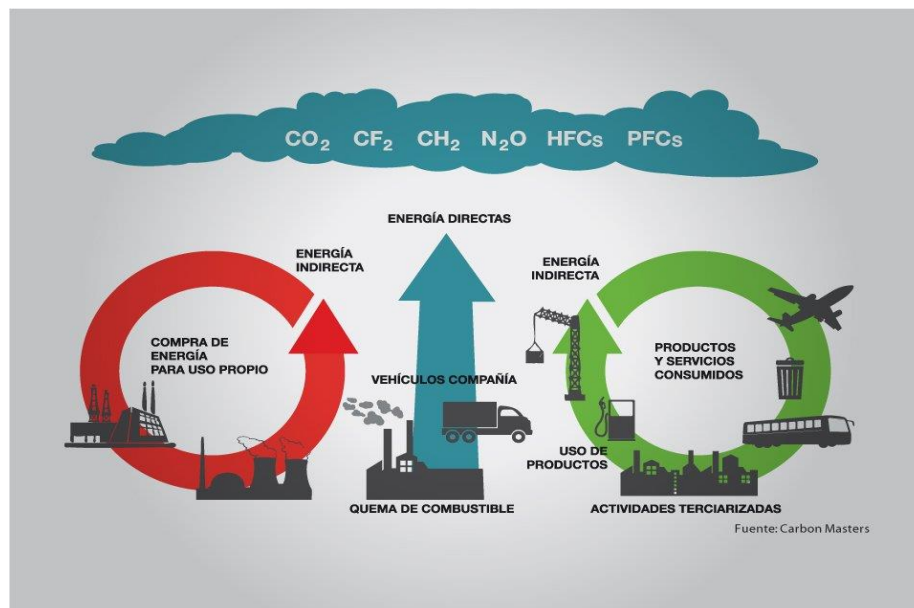


La reacción correspondiente a la calcinación de la caliza es:



La figura 1 muestra el análisis ciclo de vida de una empresa donde se toma en cuenta tanto las actividades directas como las actividades indirectas que emiten GEI. En la imagen se evidencia los GEI emitidos por las actividades del transporte, la compra de energía para uso propio, la quema de combustibles y los productos y servicios consumidos.

Figura 1. Análisis Ciclo de vida (ACV) de una determinada empresa y la emisión de GEI que se produce.



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

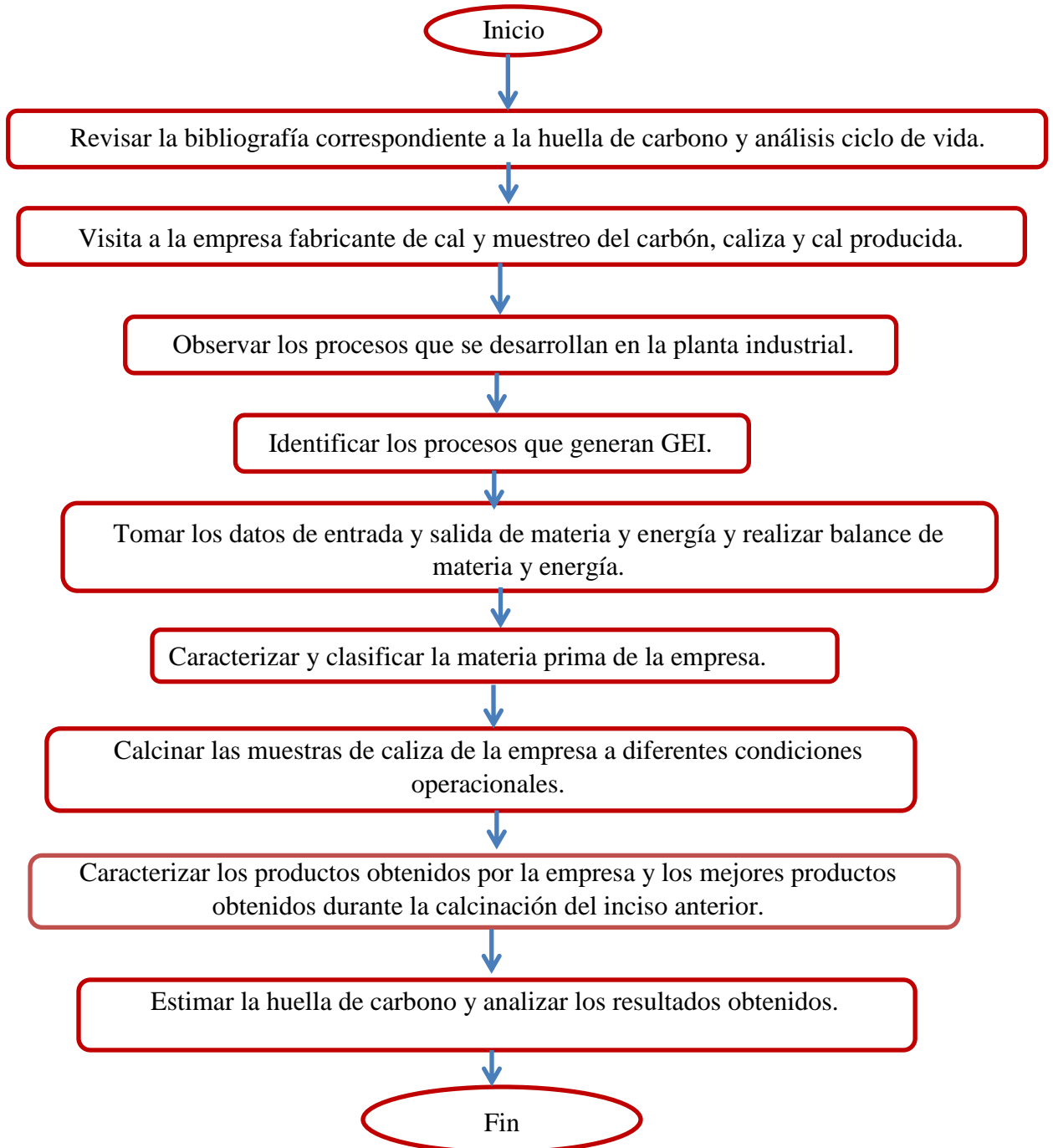
- Estimar el valor de la huella de carbono en la planta industrial de una empresa fabricante de cal mediante la evaluación del ciclo de vida de los procesos involucrados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el carbón utilizado como combustible, arcillas y cal producida en las operaciones de la planta industrial una empresa fabricante de cal.
- Realizar el balance de masa y energía correspondiente a las etapas de fabricación de cal de una empresa fabricante de cal.
- Estimar el valor de la huella de carbono en la planta industrial de una empresa fabricante de cal.

3. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología que se llevó a cabo para estimar la huella de carbono en la planta industrial de la empresa calera mediante el análisis ciclo de vida:

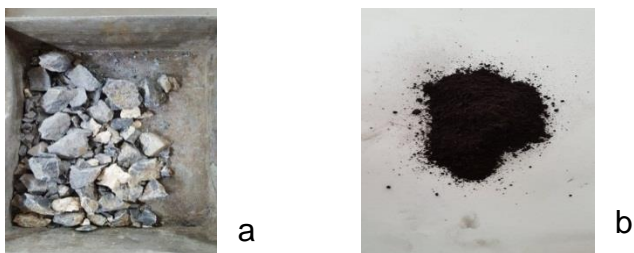


- **Revisión de la bibliografía correspondiente a la huella de carbono y análisis ciclo de vida:** Durante la realización del proyecto fue necesario el uso de fuentes bibliográficas tales como: Proyectos de grado, libros, revistas, artículos científicos y recursos electrónicos, referentes al proceso de calcinación, determinación de la huella de carbono y análisis ciclo de vida.
- **Visita la empresa fabricante de cal y muestreo de carbón, caliza y cal producida:** Se visitó la empresa con el objetivo de entrevistar a los directivos y trabajadores con el fin de obtener información que facilitara la recolección de datos.
- **Observación de los procesos que se desarrollan en la planta industrial:** En este paso se observaron las etapas que se llevan a cabo en la planta industrial de la empresa para la fabricación de los productos.
- **Identificación de los procesos que generan GEI:** Después de observar los procesos desarrollados en la planta, se procedió a identificar cuáles de los procesos llevados a cabo por la empresa producen GEI.
- **Toma de los datos de entrada y salida de materia y energía y realizar balance de materia y energía:** Se registró la cantidad de materia prima que ingresa y sale del sistema en cada etapa del proceso para realizar el respectivo balance de materia y energía.
- **Caracterización y clasificación de la materia prima de la empresa:** La clasificación de la caliza se realizó pasando ésta por una trituradora de mandíbulas, para luego ser transferida al molino de bolas y finalmente al Ro-Tap por mallas N°40, N°70, N°100, N°140 y N°200 del sistema ASTM. Para caracterizar la caliza, se realizó un análisis por difracción de rayos X, con el objetivo de conocer la composición química de ésta.

El carbón se clasificó ubicando éste en el molino de mortero para posteriormente ser caracterizado teniendo como base las normas “American Society for Testing and Materials” (ASTM). La caracterización del carbón se hizo con el propósito de poder construir el diagrama de Ostwald.

En la figura que se muestra a continuación se evidencian las muestras de carbón y caliza utilizada en el proceso de producción de cal de la empresa.

Figura 2. Materia prima utilizada por la empresa. a. Muestra de piedra caliza.
b. Muestra de carbón



- **Calcinar las muestras de caliza de la empresa a diferentes condiciones operacionales** Se realizó dicho proceso sometiendo la caliza a distintos tiempos, temperaturas y tamaños de malla. Las temperaturas se establecieron con ayuda del diagrama de Ellingham correspondiente a la descomposición de carbonatos que ronda entre los 1173,15 y 1223,15 K y los tiempos de exposición se establecieron de manera práctica, debido a que calcular la cinética de la calcinación de la caliza de manera teórica resulta bastante complejo. Los tiempos experimentales seleccionados para estas temperaturas son 45 y 60 minutos. Con relación al número de malla se seleccionaron de tal manera que no presentaran una diferencia de tamaño significativa entre ellas y que sean partículas finas. Por tanto, el número de malla seleccionado fueron los 100 retenido y los 100 pasante. Este modelo sirve como un punto de referencia a la empresa si debe o no cambiar sus condiciones de operación.
- **Caracterización de los productos obtenidos por la empresa y los mejores productos obtenidos durante la calcinación del inciso anterior:** Para caracterizar los productos, se analizaron por difracción de rayos X para conocer la composición mineralógica de los productos.
- **Estimación la huella de carbono:** Con base en la información obtenida de la empresa calera, la caracterización de la materia prima y los productos obtenidos, se procedió a estimar la cantidad de GEI liberado a la atmósfera.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN

En la tabla 1, se muestran los resultados obtenidos de manera resumida, correspondiente a la caracterización del carbón:

Tabla 1. *Resultados obtenidos correspondiente a la caracterización del carbón.*

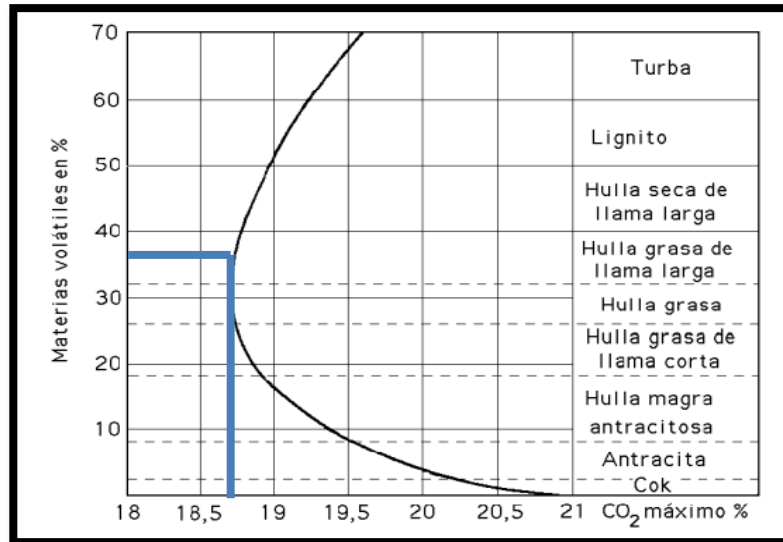
| | |
|------------------------|----------------------|
| % de Ceniza | 10,33% |
| % de Humedad | 0,33% |
| % de Materia Volátil | 38,17% |
| Poder Calorífico | 15.678,0119 [BTU/lb] |
| % de Azufre | 0,00316 |
| % de Carbono total | 68,5% |
| Índice de Hinchamiento | 1 $\frac{1}{2}$ |
| % de Hidrógeno | 4,93% |
| % de Nitrógeno | 1,525% |
| % de Carbono fijo | 44,71% |

En la tabla 1 se muestran los porcentajes de ceniza, humedad, material volátil, azufre, carbono fijo, hidrógeno y nitrógeno presentes en el carbón analizado como también el valor de poder calorífico e índice de hinchamiento. A partir de estos datos, se sabe que se trata de un **carbón bituminoso alto en volátiles tipo A**.

Los cálculos hechos para la caracterización del carbón se encuentran en el anexo A.

Para la construcción del diagrama de Ostwald se tiene como ayuda la gráfica mostrada a continuación. Se determina el % CO_2 máximo en función del porcentaje de materia volátil hallado para la caracterización del carbón.

Figura 3. Gráfica auxiliar para la determinación del % de CO_2 máximo.



De acuerdo con la figura anterior, el % de CO_2 máximo es aproximadamente 18,7%.

Con base en lo anterior, ya se puede graficar el triángulo de Ostwald, teniendo presente que el valor máximo de O_2 es de 21%.

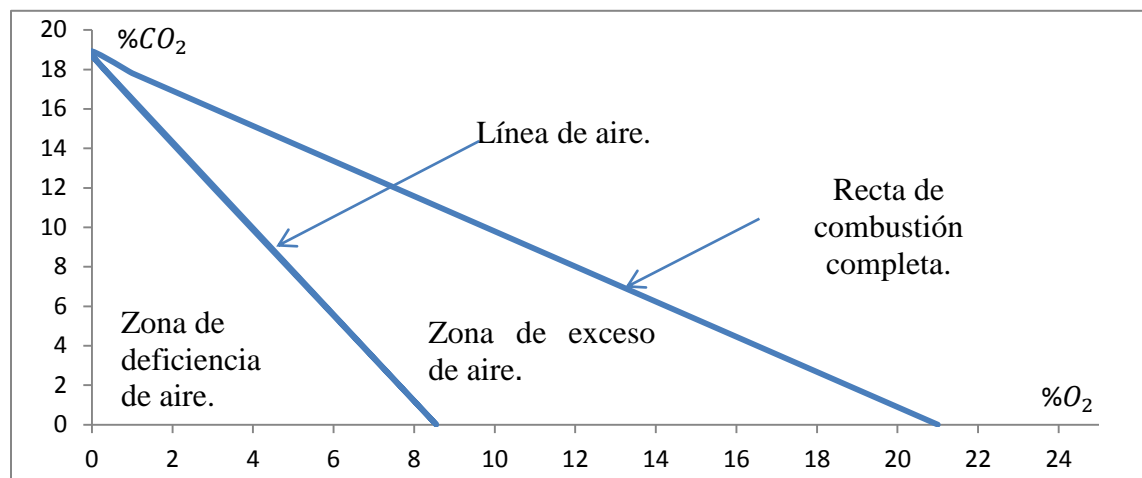
Para el trazado de la línea del aire se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\% \text{ Máximo de } CO_2}{2 + (\% \text{ Máximo de } CO_2 / 100)}$$

$$n = \frac{18,7}{2 + (18,7 / 100)} = 8,55\%$$

De ésta manera, el diagrama de Ostwald queda como se muestra a continuación:

Figura 4. Diagrama de Ostwald correspondiente al carbón usado por la planta industrial de la empresa fabricante de cal.



En la anterior figura se aprecia tanto las zonas de deficiencia de aire como también las zonas con exceso de aire. Realizando un análisis de humos se podría calcular el porcentaje de gases de CO_2 y CO que son emitidos y saber si se requiere de mayor control de las condiciones del horno.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CALIZA Y CAL PRODUCIDA POR LA EMPRESA

Como se mencionó anteriormente, la caracterización se hizo por medio de unas pruebas de difracción de rayos X. La composición química de las muestras se indica a continuación:

Tabla 2. *Composición química de la cal viva obtenida por la empresa.*

| FASE | | PDF No. | NOMBRE | CUANTITATIVO |
|-------------------|---------------|-------------|------------------------------|--------------|
| Cristalino | $Ca_2(SiO_4)$ | 010-80-0941 | Γ -Silicato de calcio | 11,0% |
| | $Ca(OH)_2$ | 010-87-0673 | Portlandita | 15,7% |
| | SiO_2 | 010-85- | Cuarzo | 3,8% |

| | | | | |
|--|--|-------------|-----------------------------|--------|
| | | 0796 | | |
| | CaO | 010-82-1690 | Óxido de calcio | 17,5% |
| | $Ca_2(SiO_4)$ | 010-86-0398 | β -Silicato de calcio | 11,8% |
| | $Ca(OH)_2$ | 010-84-1273 | Hidróxido de calcio | 16,99% |
| | $Ca_3Si_2O_7$ | 010-76-0623 | Rankinita | 7,6% |
| | $Ca_2(Al_2SiO_7)$ | 010-76-7523 | Gehlenita | 4,9% |
| | SiO_2 | 010-77-1725 | Coesita | 1,8% |
| | $Ca_2(Al_{0-25}Mg_{80-75})$ $((Al_{0-25}Si_{1-75})O_7)$ | 010-76-7539 | Akermanita-Gehlenita | 1,5% |
| | $Ca(OH)_2$ | 010-70-6444 | Portlandita HP | 5,1% |
| | $Ca(CO)_3$ | 010-76-2712 | Calcita | 0,5% |
| | MgO | 010-89-4248 | Periclasa | 0,9% |
| | $Ca(SO)_4$ | 010-80-6360 | Anhídrita | 1,0% |

Tabla 3. Composición química de la cal hidratada obtenida por la empresa.

| FASE | | PDF No. | NOMBRE | CUANTITATIVO |
|------------|-------------------|-------------|----------------------|--------------|
| Cristalino | $Ca(OH)_2$ | 010-87-0673 | Portlandita | 58,9% |
| | SiO_2 | 010-85-0796 | Cuarzo | 4,5% |
| | $Ca(CO)_3$ | 010-76-2712 | Calcita | 2,5% |
| | CaO | 010-77-9524 | Óxido de calcio | 1,2% |
| | $Ca_2(SiO_4)$ | 010-80-0941 | Γ-Silicato de calcio | 2,4% |
| | $Ca_2(SiO_4)$ | 010-86-0398 | β-Silicato de calcio | 11,4% |
| | $Ca(SO)_4$ | 010-86-0398 | Anhidrita | 0,6% |
| | $Ca(OH)_2$ | 010-84-1270 | Hidróxido de calcio | 9,3% |
| | $Ca_2(Al_2SiO_7)$ | 010-76-7522 | Gehlenita | 2,1% |
| | $Ca_3Si_2O_7$ | 010-76-0623 | Rankinita | 2,7% |
| | SiO_2 | 010-77-1726 | Coesita | 1,6% |
| | MgO | 010-89-4248 | Periclasa | 0,9% |
| | $Na(AlSi_3O_8)$ | 010-83-1613 | Albita alta | 1,7% |

Tabla 4. Composición química de la caliza usada por la empresa.

| FASE | | PDF No. | NOMBRE | CUANTITATIVO |
|------|---------|-------------|--------|--------------|
| | SiO_2 | 010-85-0796 | Cuarzo | 5,6% |

| | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|-------|
| | $Ca(CO)_3$ | 010-86-2334 | Calcita | 92,9% |
| | $Mg_{2-5}Fe_{1-65}Al_{1-5}$ $Si_{2-2}Al_{1-8}O_{10}$ $(OH)_8$ | 010-89-2972 | Clinocloro 1 Mla | N.C |
| | $CaMg(CO_3)_2$ | 010-81-8229 | Dolomita | 1,5% |

En los datos descritos en las tablas 2 y 3 se muestra los compuestos presentes en la cal viva y la cal hidratada respectivamente producida por la empresa siendo el CaO y el $Ca(OH)_2$ los compuestos más importantes mientras que la tabla 4 muestra la composición química de la caliza usada por la empresa siendo el $Ca(CO)_3$ el compuesto de mayor importancia.

Los difractogramas para cada muestra de la empresa se encuentran presentes en el anexo B.

4.3 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA EMPRESA FABRICANTE DE CAL

En las tablas 5 y 6 que se indican a continuación, se muestran los valores de consumo eléctrico diario para la fabricación de la cal y el consumo de combustible para el transporte de la misma respectivamente:

Tabla 5. *Valores de consumo eléctrico de los equipos empleados en los procesos de elaboración de cal.*

| Procesos | Consumo [Kwh] |
|---------------------------|---------------|
| Trituración | 1,975 |
| Horno calcinador | 40,848 |
| Secado | 3,216 |
| Ciclón y filtro de mangas | 3,048 |

Tabla 6. *Consumo y tipo de combustible de los vehículos utilizados en la empresa.*

| | Tipo de vehículo | Tipo de combustible | Consumo [GPD] |
|---|------------------|---------------------|---------------|
| 1 | Camioneta | Gasolina Corriente | 5 |
| 2 | Camiones | ACPM Diésel | 10 |

Para cada proceso, se procede a estimar la cantidad de kilogramos equivalentes de CO_2 según el factor de emisión propuesto por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) usando la ecuación (I). Los factores usados para los combustibles se encuentran en el anexo C.

4.4 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL CONSUMO ELÉCTRICO

$$Kg \text{ equivalente de } CO_2(\text{Trituración}) = 0.175737 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{h} * 1.975 \text{ Kwh}$$

$$Kg \text{ de } CO_2(\text{Trituración})/\text{día} = 0,347 * 24 = 8,33$$

$$Kg \text{ equivalente de } CO_2(\text{Horno}) = 0.175737 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{h} * 40,848 \text{ Kwh}$$

$$Kg \text{ de } CO_2(\text{Horno})/\text{día} = 7,1785 * 24 = 172,284$$

$$Kg \text{ equivalente de } CO_2(\text{Secado}) = 0.175737 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{h} * 3,216 \text{ Kwh}$$

$$Kg \text{ de } CO_2(\text{Secado})/\text{día} = 0,565 * 24 = 13,55$$

$$Kg \text{ equivalente de } CO_2(\text{Ciclón y filtro}) = 0.175737 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{h} * 3,048 \text{ Kwh}$$

$$Kg \text{ de } CO_2(\text{Ciclón y filtro})/\text{día} = 0,537 * 24 = 12,855$$

4.5 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LOS VEHÍCULOS USADOS POR LA EMPRESA

$$Kg \text{ equivalente de } CO_2(\text{Corriente}) = 8,78 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{h} * 5 \text{ GPD}$$

$$Kg \text{ de } CO_2 (\text{Corriente})/\text{día} = 43,9$$

$$Kg \text{ equivalente de } CO_2(\text{Diesel}) = 10,21 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{h} * 10 \text{ GPD}$$

$$Kg \text{ de } CO_2 (\text{Diesel})/\text{día} = 102,1$$

4.6 CANTIDAD DE CO_2 PRODUCIDO POR LA CALCINACIÓN DE LA CALIZA

Según la ecuación (III), existe una relación 1:1:1 molar entre la caliza utilizada, el CO_2 emitido y el CaO producido. Usando la estequiometría como base, se halla la cantidad de CO_2 , teniendo como consideración que la cantidad de caliza usada por la planta industrial por día corresponde a diez toneladas (10 t).

$$10000000 \frac{g \text{ de } CaCO_3}{día} * \frac{1 \text{ mol } CaCO_3}{100 \text{ g}} * \frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } CaCO_3} * \frac{44 \text{ g de } CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} * 0,929$$

$$kg \text{ de } CO_2 \text{ emitidos/día} = 4087,6$$

4.7 CANTIDAD DE CO_2 PRODUCIDO POR LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN

Para hallar esta cantidad, también se hace uso de la estequiometría y se tiene como consideración que la cantidad de carbón utilizada por día es de cuatro toneladas (4 t), que la eficiencia del horno usado es de 78% y que el porcentaje de carbono fijo es de 44,71%. Suponiendo que se trata de una combustión completa, la relación molar entre el carbono y CO_2 emitido por combustión es de 1:1 como se indica en la ecuación (II).

$$4000000 \frac{g \text{ de } C}{día} * \frac{1 \text{ mol } C}{12 \text{ g de } C} * \frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C} * \frac{44 \text{ g de } CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} * 0,78 * 0,685$$

$$kg \text{ de } CO_2 \text{ emitidos/día} = 7836,4$$

4.8 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO TOTAL

Se procede a realizar una sumatoria de todos los valores que producen CO_2 para de esta manera hallar la cantidad de este gas emitida por la empresa fabricante de cal.

Realizando la suma de todos los procesos nos da una huella de carbono aproximada de:

$$Kg \text{ de } CO_2/día = 12277,019$$

La tabla muestra los valores resumidos de los datos obtenidos para la estimación de la huella de carbono:

Tabla 7. Resultados obtenidos de la cantidad de CO_2 generado para cada proceso junto con la huella de carbono total de la empresa.

| Proceso | Cantidad de CO_2 [kg/día] |
|---------------------------|-----------------------------|
| Trituración | 8,33 |
| Horno calcinador | 172,284 |
| Secador | 13,55 |
| Ciclón y filtro de mangas | 12,855 |
| Transporte | 146 |
| Calcinación de la caliza | 4087,6 |
| Combustión del carbón | 7836,4 |
| Total | 12277,019 |

Teniendo en cuenta el resultado de huella de carbono obtenido y debido a que se tratan de emisiones discontinuas, resulta más conveniente expresar las emisiones de CO_2 en unidades de masa sobre cantidad de carbón usada. Con el dato suministrado por la empresa de que se usa 4 t de carbón por día, el valor de huella de carbono sería igual a 3,07 t equivalente de CO_2 / t de carbón usado. Para conocer el impacto ambiental que tiene la empresa se realizó una conversión a t de CO_2 / año. Promediando que el horno calcinador trabaja 20 horas a la semana, en la empresa se produce una cantidad de 491,0688 t de CO_2 / año y que las emisiones anuales de Colombia según las Organización de las Naciones Unidas (ONU) están en los alrededores de 80976 t de CO_2 / año, la empresa genera un 0,006% de emisiones de éste gas por lo que se puede decir que se genera un valor permisible que no causa daños significativos al ambiente pero que puede ser mejorada con un adecuado control de las condiciones de operación del horno.

4.9 CALCINACIÓN DE LA CALIZA A DIFERENTES CONDICIONES OPERACIONALES

Las condiciones a las que fue expuesta la caliza junto con los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 8:

Tabla 8. Resultados obtenidos después de realizado el proceso de calcinación.

| Peso de la muestra [g] | Número de malla | Temperatura [K] | Tiempo [minutos] | Cantidad de CO_2 [g] | Cantidad de CO_3^- [%] |
|------------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------------|--------------------------|
| 25,20 | +100 | 1173,15 | 45 | 10,1973 | 69 |
| 25,027 | +100 | 1173,15 | 60 | 10,1016 | 72 |
| 25,0245 | +100 | 1223,15 | 45 | 13,727 | 69 |
| 25,1331 | +100 | 1223,15 | 60 | 10,3378 | 75 |
| 24,99 | -100 | 1173,15 | 45 | 9,9423 | 78 |
| 25,1330 | -100 | 1173,15 | 60 | 10,3087 | 78 |
| 25,0190 | -100 | 1223,15 | 45 | 10,0829 | 84 |
| 25,0760 | -100 | 1223,15 | 60 | 10,2807 | 84 |

Para confirmar que se la combustión ocurrida para cada modelo resultada ser completa, se realizó una prueba de SEM (Anexo D) a la muestra que fue expuesta a una temperatura de 1223,15 K, número de malla -100 y tiempo de 60 minutos. Se observa a diferentes aumentos que los gases logran escaparse dejando en evidencia los poros observados en las imágenes (los espacios blancos). La composición química del mejor resultado (1223,15 K y 45 minutos) se encuentra en el anexo E.

Comparando los resultados obtenidos en el anexo E y los resultados obtenidos por la difracción de rayos X de los productos obtenidos por la empresa (Tabla 2 y tabla 3), se

observa que la sumatoria del porcentaje de cal obtenida a nivel de laboratorio (CaO y $Ca(OH)_2$) son mayores entre un rango de 55,29% y 69,4% para la cal viva y la cal hidratada respectivamente. Esto sugiere que debe haber un mejor control de las condiciones operacionales del horno (Temperatura, tiempo y granulometría) con el fin de obtener un mejor producto final.

Según los resultados obtenidos la variable independiente que tuvo mayor influencia sobre la cantidad de CO_3^- fue la temperatura. Esto ocurre debido a que sin importar que se haya tratado de un tiempo de 45 o 60 minutos, la cantidad de carbonatos era mayor cuando se trabajaba con la temperatura de 1223,15 K y por tanto la calcinación ocurría de una mejor manera. Con respecto al CO_2 al tener una temperatura de descomposición de aproximadamente 973,15 K, las temperaturas en el modelo estadístico no es un factor tan importante como lo es con la cantidad de CO_3^- pero sigue siendo la variable más importante porque llegado el caso que no se alcance la temperatura de 973,15 K, no habría emisiones de CO_2 . Por esta razón los valores de CO_2 no presentaron grandes variaciones.

Con ayuda del software “Statgraphics”, se estudió la influencia de cada una de las variables independientes (temperatura, tiempo y granulometría) sobre las variables dependientes (cantidad de CO_3^- y CO_2) obteniéndose los siguientes resultados:

Figura 5. Análisis de varianza de la cantidad de CO_2 en función de la temperatura, número de malla y tiempo.

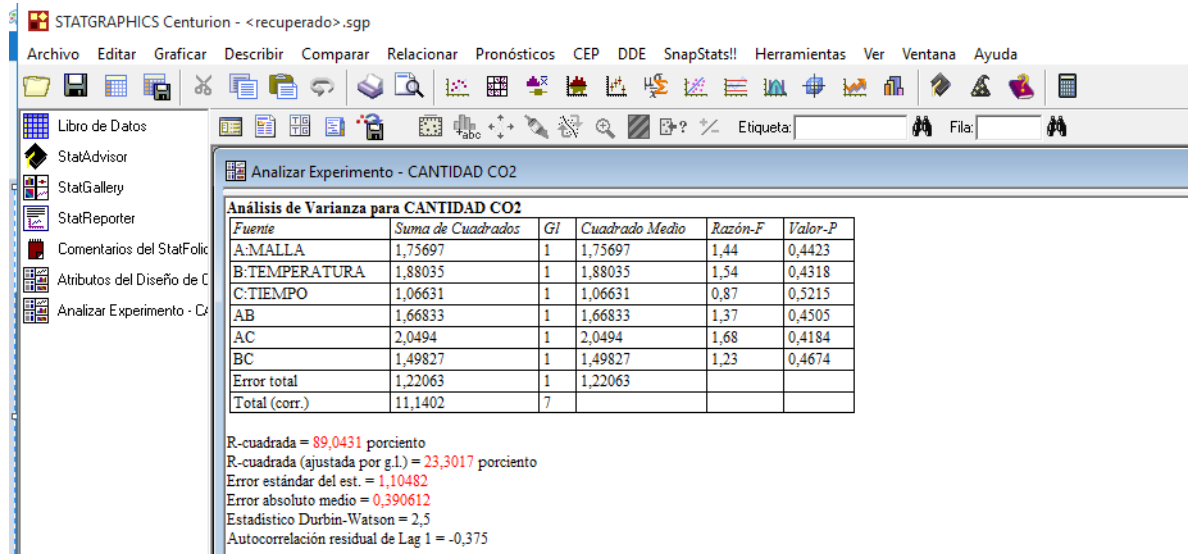


Figura 6. Análisis de varianza de la cantidad de CO_3 en función de la temperatura, número de malla y tiempo.

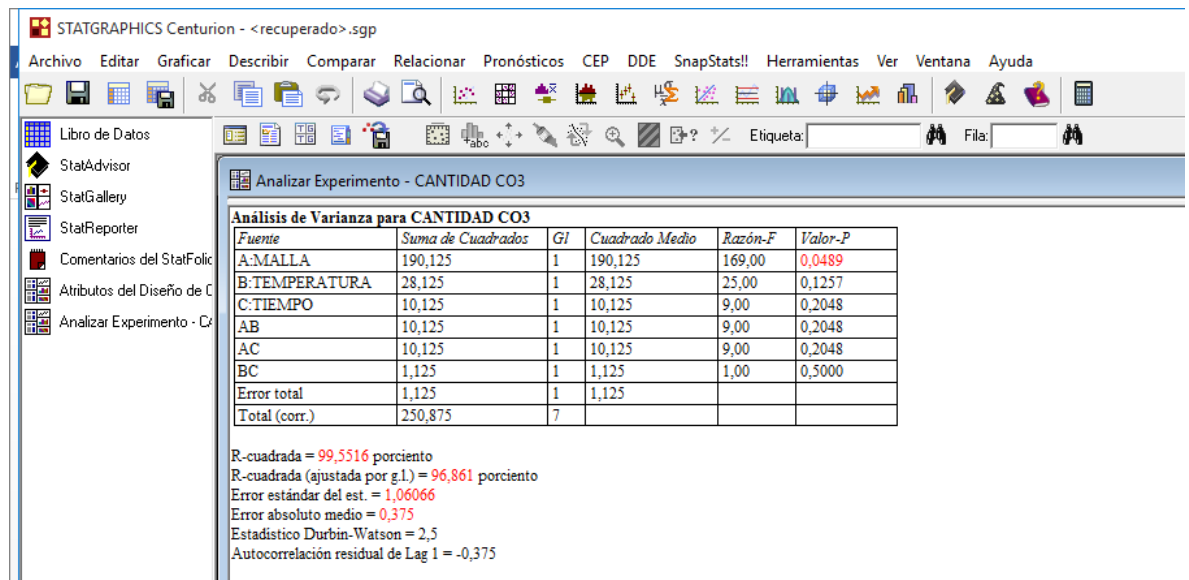


Figura 7. Superficie de respuesta de la cantidad de CO_2 en función de la temperatura y número de malla con un tiempo de optimización.

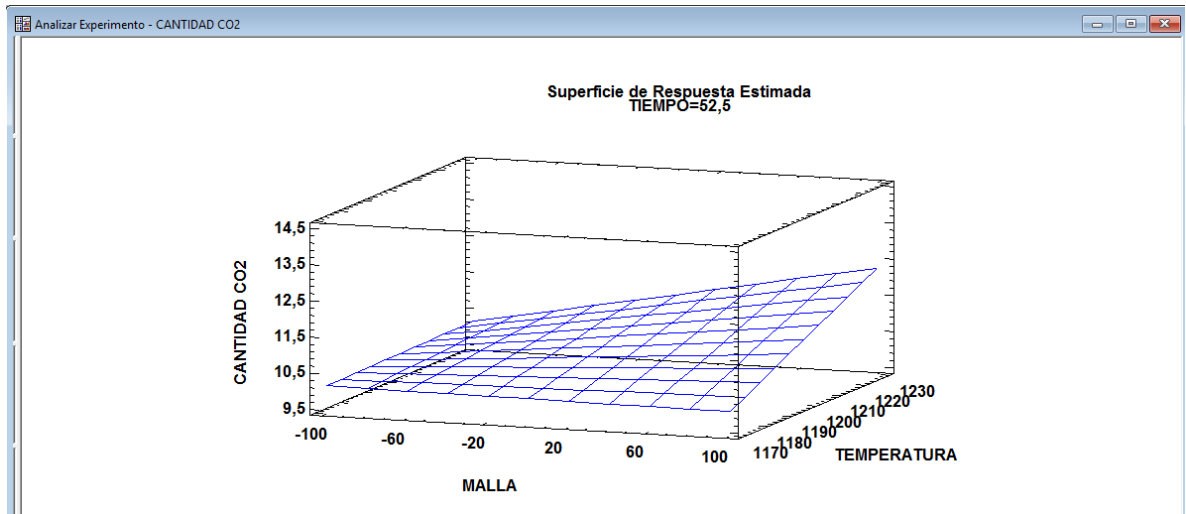
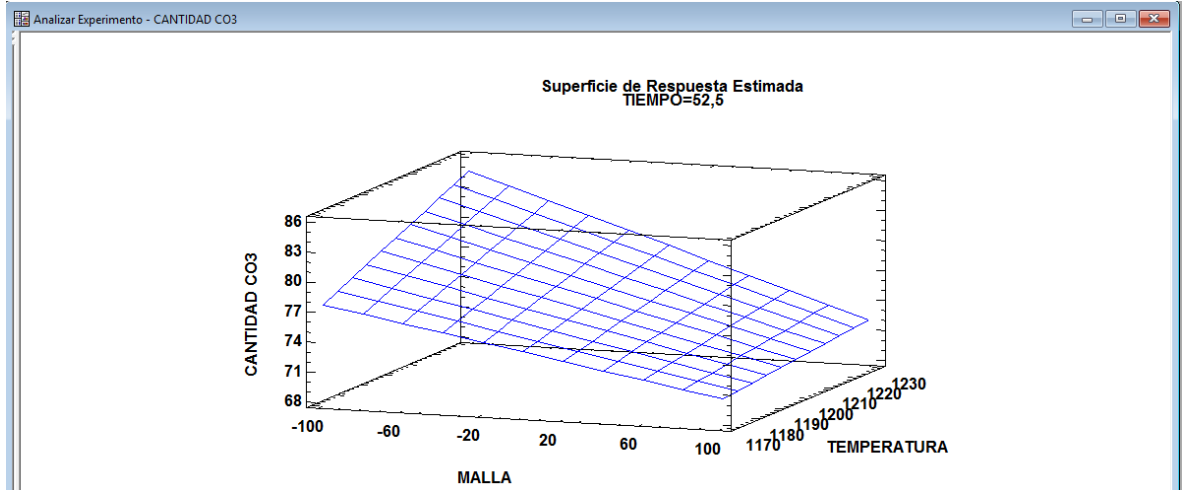


Figura 8. Superficie de respuesta de la cantidad de CO_3^- en función de la temperatura y número de malla con un tiempo de optimización.



Con la ayuda del Software “Statgraphics” y con las figuras 7,8.9 y 10 se corrobora que la temperatura es la variable independiente que mayor influencia tiene sobre las variables

dependientes de CO_2 y CO_3^- por tanto será la variable que tendrá mayor influencia a la hora de obtener una calcinación exitosa.

Con respecto a la cantidad de CO_3^- , al obtenerse un valor de R-cuadrada ajustada de 96,861%, el modelo estadístico sí cumple para hallar un estimado de la cantidad máxima de CO_3^- . Los números de malla usados en el experimento, no tuvieron casi influencia con respecto a la cantidad de CO_3^- debido a que la diferencia entre el número de malla es muy mínimo y por ende la superficie de contacto es casi igual en ambos casos. Sin embargo, para tener un modelo estadístico para el CO_2 , se debe hacer un modelo que tenga mayor número de muestras, debido a que el valor de R-cuadrada no es del todo confiable.

La variable independiente que tuvo más influencia sobre las variables dependientes (CO_2 y CO_3^-) fue la temperatura, tal como se evidencia en las superficies de respuesta (figura 9 y 10); mientras que el tiempo de optimización, (mayor cantidad de CO_3^- sin someter la muestra a un tiempo excesivo) resultó ser de 52,5 minutos, el cual sería el tiempo ideal de calcinación de la caliza usada por la empresa.

Con la ayuda del software “Statgraphics”, también se pudo calcular ecuaciones con factor de correlación lineal de las variables dependientes en función de cada una de las variables independientes.

La ecuación correspondiente para la cantidad de CO_2 resultó ser:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de } CO_2 = & -155,241 - 0,178744 * \text{Malla} + 0,140566 * \text{Temperatura} + \\ & 2,71673 * \text{Tiem} + 0,000182665 * \text{Malla} * \text{Temperatura} - 0,00067485 * \text{Malla} * \text{Tiem} - \\ & 0,00230807 * \text{Temperatura} * \text{Tiem} \dots \dots \dots \text{ (IV)} \end{aligned}$$

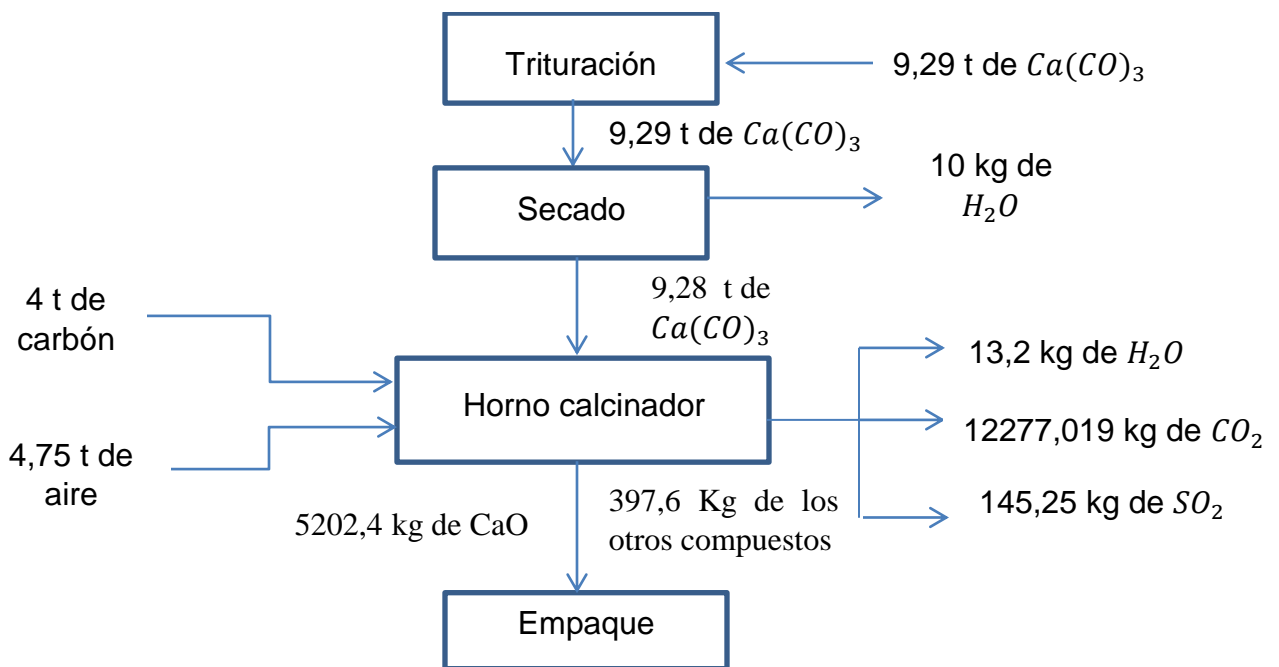
Por último, la ecuación correspondiente a la cantidad de CO_3^-

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de } CO_3^- = & 104,195 + 0,411668 * \text{Malla} - 0,03 * \text{Temperatura} - 2,2463 * \text{Tiem} - \\ & 0,00045 * \text{Malla} * \text{Temperatura} + 0,0015 * \text{Malla} * \text{Tiem} + \\ & 0,002 * \text{Temperatura} * \text{Tiem} \dots \dots \dots \text{ (V)} \end{aligned}$$

4.10. BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE LA EMPRESA FABRICANTE DE CAL

Teniendo como base los datos recolectados por la empresa, se procede a realizar el balance de materia por día que será muestra a continuación:

Figura 9. Balance de masa correspondiente a la planta industrial de la empresa fabricante de cal.

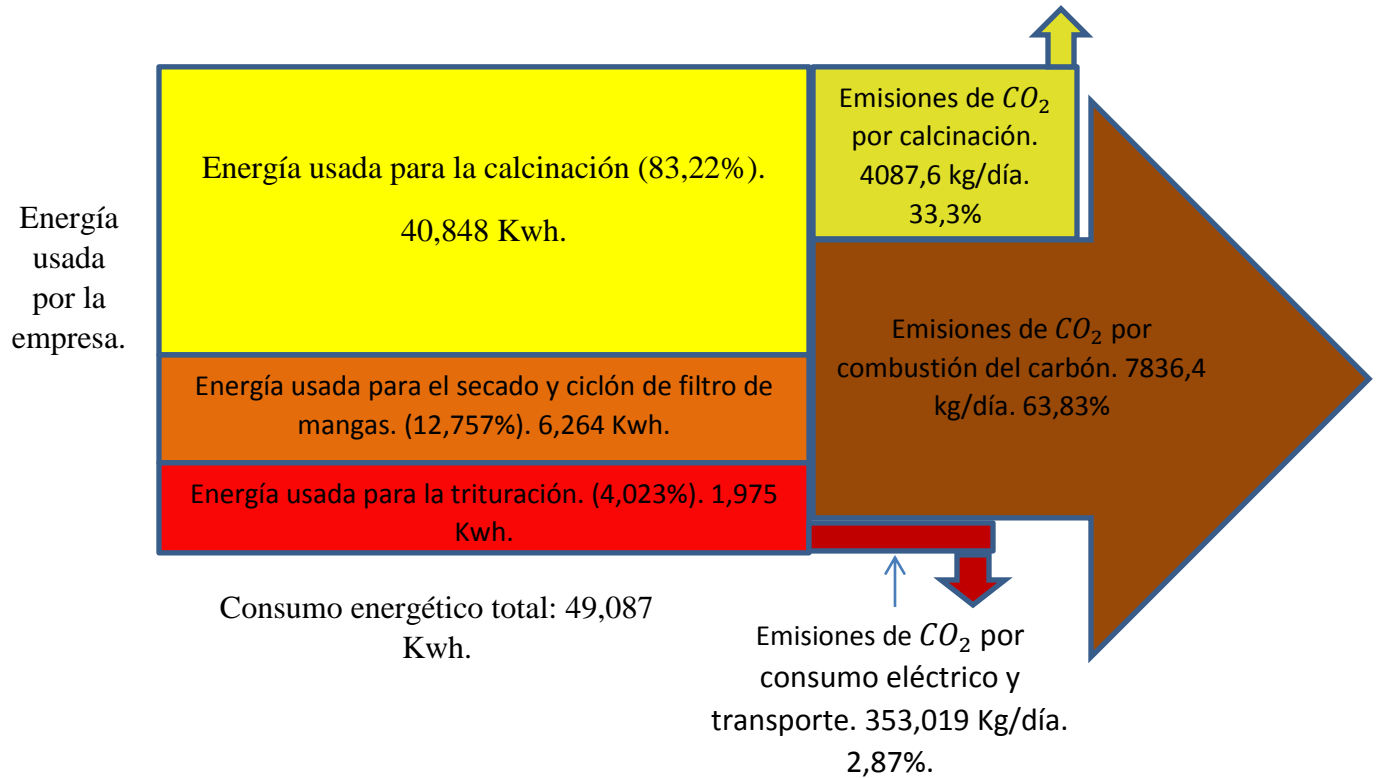


Del balance de materia se puede apreciar que el proceso que genera mayores emisiones de GEI resulta ser el ocurrido en el horno calcinador.

4.11 BALANCE DE ENERGÍA DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE LA EMPRESA FABRICANTE DE CAL

Teniendo como base los datos recolectados por la empresa, se procede a realizar el balance de energía por día, que se muestra a continuación:

Figura 10. Diagrama de Sankey correspondiente a la planta industrial de la empresa fabricante de cal.



Después de haber realizado los respectivos balances de materia y energía, se puede afirmar que el proceso de mayor importancia para la fabricación de cal sucede en el horno calcinador. Tener buenas condiciones operacionales de tiempo, temperatura y número de malla en el horno calcinador, es de gran relevancia a la hora de obtener un buen producto con la menor emisión de GEI posible y por ende, es el proceso que mayor control necesita. Debido a los resultados obtenidos en cuanto la caracterización de la cal y caliza de la empresa, se debe necesario tener un control de la temperatura; dado que los resultados indican que se debe aumentar la temperatura hasta aproximadamente unos 1200 K durante 50 minutos para obtener un mejor producto con la menor cantidad posible de GEI emitidos.

5. CONCLUSIONES

- La huella de carbono de la empresa Calizas de Colombia es de 3,07 t de CO_2 / t de carbón usado. Es un valor permisible debido a la poca emisión de CO_2 comparada a la emitida por Colombia. Solamente un 0,006065% de la contaminación total generada por Colombia es generada por la empresa fabricante de cal.
- En la calcinación de la caliza se aprecia que la variable independiente que ejerce la mayor influencia en los valores de CO_2 y CO_3^- es la temperatura. Esto se debe a los resultados obtenidos por el diseño experimental
- Estableciendo una comparación entre partículas finas con número malla 100 pasante y 100 retenido no se presentaron mayores diferencias en cuanto la obtención del producto final debido a que no existe gran diferencia en su superficie de contacto y esto se evidenció en los resultados obtenidos por el diseño experimental.
- En las pruebas realizadas a nivel de laboratorio en el proceso de calcinación el producto obtenido cumple con las características exigidas por los clientes. La mejoría se encuentra en que el producto final tiene un porcentaje mayor de cal viva o hidratada entre 20,7 y 39,91%. Esto se evidencia en los resultados obtenidos por la difracción de rayos X de los productos obtenidos por la empresa y los productos obtenidos por el diseño experimental.
- Respecto a la planta industrial y áreas administrativas de la empresa, el proceso más relevante y que requiere mayor atención es el que ocurre en el horno calcinador. El 83,22% del gasto energético de la empresa ocurre en el horno además de ser el proceso donde se genera el 98% de emisiones de GEI.

6. RECOMENDACIONES

Para la obtención de un buen producto con la menor emisión posible de GEI se requiere tener un adecuado control de las variables operacionales de temperatura, tiempo y granulometría de la materia que se calcina (Piedra caliza).

El proceso que requiere mayor control es en el horno. Por tanto se recomienda el uso de termopares para tener un control de la temperatura dentro del horno.

La construcción del diagrama de Ostwald constituye una herramienta para hallar cantidades de CO_2 y CO producido por la combustión de un combustible fósil cuando se presente una combustión incompleta. Es de gran importancia tener un buen manejo de dicho diagrama.

Realizar un balance de materia y energía se constituye en la herramienta de trabajo más adecuada para conocer mejor el comportamiento del proceso; tanto para conocer la cantidad de gases generados como también el conocimiento de los procesos que mayor gasto de energía.

REFERENCIAS

- [1] SANABRIA GAMBOA, Andrés Felipe. VELÁSQUEZ VELÁSQUEZ, Robinson. Determinación de la huella de carbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyacá, mediante análisis de ciclo de vida. Santander: Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [2] BENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo. LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza. Información Técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Nota técnica del IDEAM. Bogotá, D.C., 2007. 102 p.
- [3] ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2015. Ginebra: OMM- N°1167, 2016. 28 p. ISBN 978-92-63-31167-2.
- [4] ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ESPOL). 3. Combustión [en línea]. < > [Citado en 15 de Noviembre de 2016] Tomado de: <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/apuntes%20de%20combustion.pdf>
- [5] VESGA SALAMANCA, Julián Mauricio. GUERRERO RODRÍGUEZ, Edwing. Evaluación del proceso de beneficio de mineral calcáreo perteneciente al distrito minero “Los Santos” a nivel de laboratorio. Universidad Industrial de Santander. 2012
- [6] ROSENQVIST, Terkel. Fundamentos de metalurgia extractiva, Limuna, México, 1987.
- [7] SOHN y TURKDOGAN. “Procesos Metalúrgicos. Calcinación. En cinética de los procesos de la Metalurgia Extractiva, Sohn, H Y Wadsworth, Milton E, (editores), Editorial Trillasm México, 1966.
- [8] HORCALSA. Procesos de Elaboración de cal [en línea]. < <http://horcalsa.com/proceso-de-elaboracion-de-cal/> > [citado en 15 de Noviembre de 2016]
- [9] MOFFAT, Wicky. WALMSLEY M.R. W .Understanding Lime Calcination Kinetics for Energy Cost Reduction. Presented at the 59th Appita Conference, Auckland, New Zeland 16-19. May 2006.

- [10] MUÑOZ SANGUINETTI, Claudia. QUIROZ ORTIZ, Francisco. Análisis de ciclo de vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudiado planta producto. Región Bío Bío, Chile. Concepción: Revista Hábitat Sustentable, 2014. 10 p. ISSN 0719-0700.
- [11]. DÍAZ BATANERO María del Carmen. BATANERO BERNABÉU, Carmen. Análisis de Datos con Statgraphics, Editorial Granada, 2008.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Classification of Coals by Rank. ASTM D-388. West Conshohocken, PA, USA. 2012.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. ASTM D-3174. West Conshohocken, PA, USA. 2012.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Free-Swelling Index of Coal. ASTM D-720. West Conshohocken, PA, USA. 2010.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Isoperibol Bomb Calorimeter. ASTM D-3286. West Conshohocken, PA, USA. 1996.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM D-3173. West Conshohocken, PA, USA. 2011.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM D-3177. West Conshohocken, PA, USA. 2007.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke ASTM D-3175. West Conshohocken, PA, USA. 2011.

ANEXOS

ANEXO A

Cálculos realizados para la caracterización del carbono

Porcentaje de ceniza en el carbón

-Peso final de la muestra sumado con el crisol y la tapa = A = 15.6217 g

-Peso del crisol vacío= B = 15.4983 g

-Peso inicial de la muestra = 1.1935 g

$$\%Ceniza = \frac{A - B}{C} * 100 = \frac{15.6217 - 15.4983}{1.1935} * 100$$

$$\%Ceniza = 10.33\%$$

Porcentaje de humedad en el carbón

-Peso del crisol más la muestra antes de calentar = A = 19.3767 g

-Peso del crisol más la muestra después de calentar = B = 19.3110 g

$$\%Humedad = \frac{A - B}{A} * 100 = \frac{19.3767 - 19.3110}{19.3767} * 100$$

$$\%Humedad = 0.33\%$$

Materia volátil

-Peso del crisol con tapa sumado la muestra antes de calentar = 22.5575 g

-Peso del crisol con tapa sumado la muestra después de calentar = 22.1609 g

$$\%Materia\ volátil = \%Pérdida\ de\ peso - \%Humedad$$

$$\%Materia\ volátil = \left(\frac{22.5575 - 22.1609}{1,03} * 100 \right) - 0.33$$

$$\%Materia\ volátil = 38,17\%$$

Poder calorífico

-Incremento de la temperatura = $\Delta T = 1.6^{\circ}\text{C}$

-Capacidad térmica del calorímetro = $C = 5088.366 \text{ BTU/lb}^{\circ}\text{C}$

-Calor de combustión del algodón = $e_1 = 0$

-Calor de combustión del alambre fusible = $e_2 = 0.41 \cdot 15 = 6.15 \text{ BTU/lb}$

-Calor de formación del ácido sulfúrico = $e_3 = 10 \cdot 2.5 = 25 \text{ BTU/lb}$

-Peso de la muestra = $m = 0.5173 \text{ g}$

$$\text{Poder calorífico} = \frac{(\Delta T * C) - e_1 - e_2 - e_3}{m} = \frac{(1.6 * 5088.366) - 31.15}{0.5173}$$

$$\text{Poder calorífico} = 15.678.0119 \text{ BTU/lb}$$

Contenido de azufre

-Peso del crisol antes= 15,9167

-Peso del crisol después= 15,9471

-Peso de la muestra = 0,5173 g

Para hallar B se calcula en porcentaje la pérdida de peso y A es una constante que es equivalente a 0,000624

$$\%S = \frac{A * B}{m} * 13,738 = \frac{0.000624 * \frac{15.9471 - 15.9167}{15.9167} * 100}{0,5173} * 13.738$$

$$\%S = 0,00316\%$$

Porcentaje de carbono total, hidrógeno y nitrógeno: Éstos se calcularon mediante el uso del equipo CHN, dándonos los siguientes valores:

-Carbono total = 76.12%

-Porcentaje de Hidrógeno = 4,93%

-Porcentaje de Nitrógeno = 1,525%

Porcentaje de carbono fijo

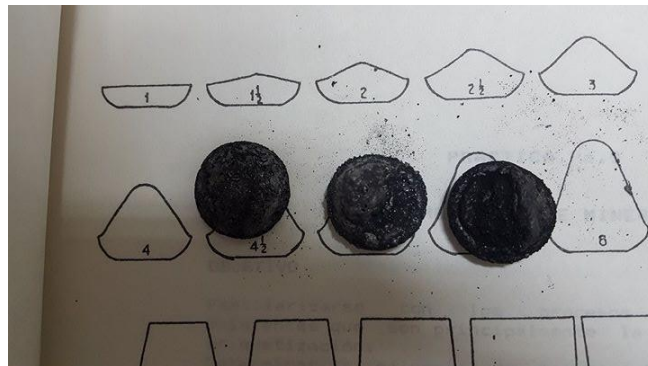
$$\%C = 100 - \%Materia\ volátil - \%Humedad - \%S - \%Ceniza - \%N - \%H_2$$

$$\%C = 100 - 0,000316 - 38,17 - 0,33 - 10,33 - 4,93\% - 1,525\%$$

$$\%C = 44,71\%$$

Índice de hinchamiento

Figura 11. Comparación de los perfiles entre el obtenido después de la realización del proceso y los perfiles establecidos con la norma.



ANEXO B

Figura 12. Difractograma correspondiente a la cal viva.

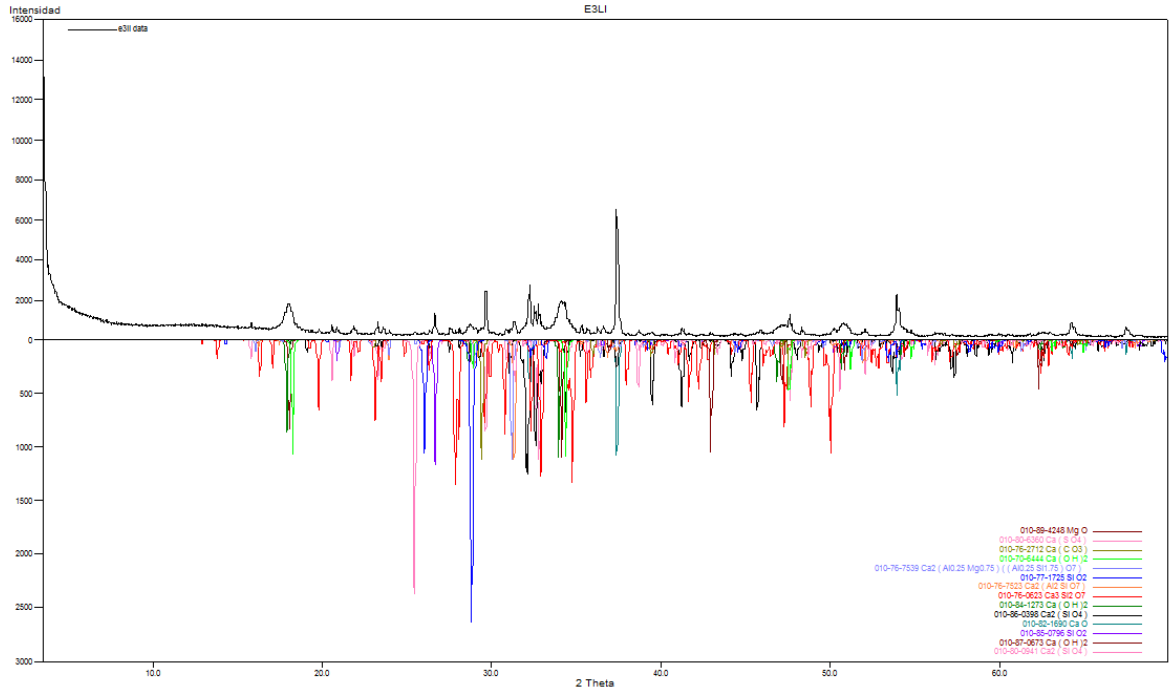


Figura 13. Difractograma correspondiente a la cal hidratada

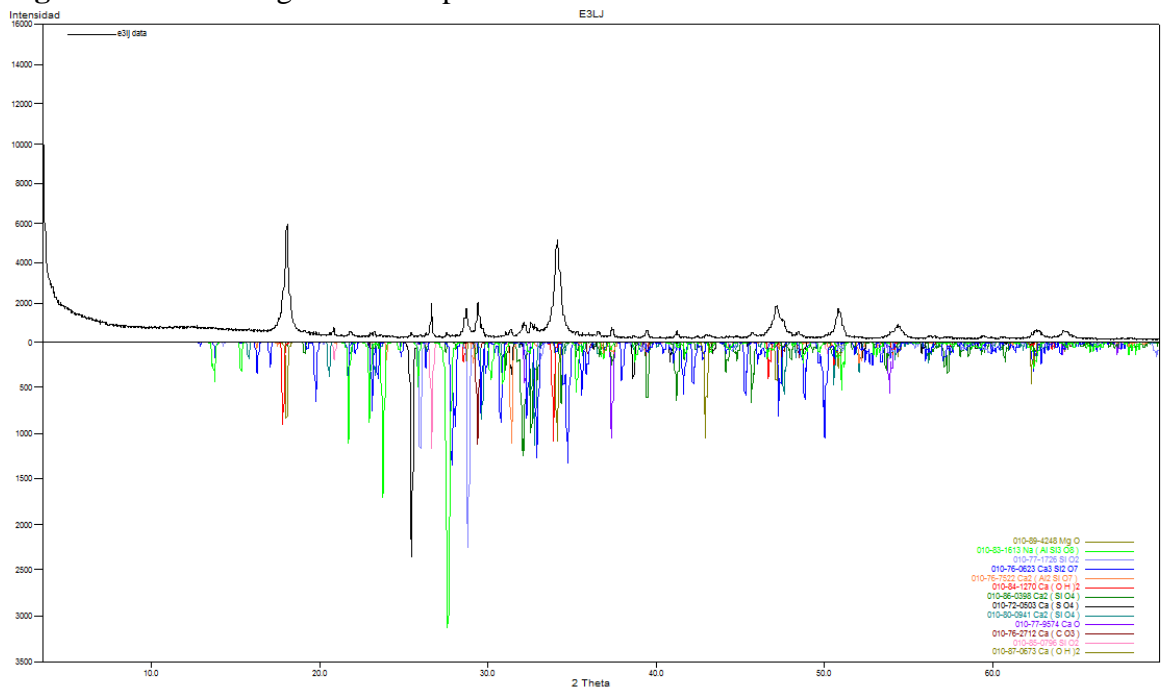
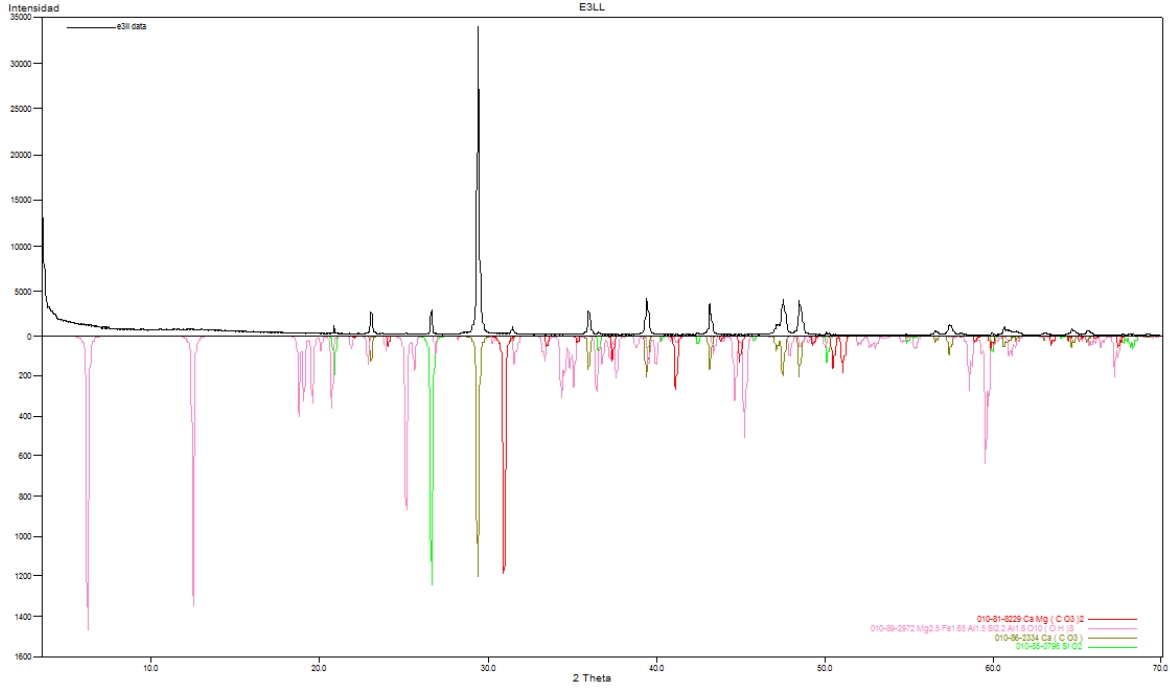


Figura 14. Difractograma correspondiente a la caliza.



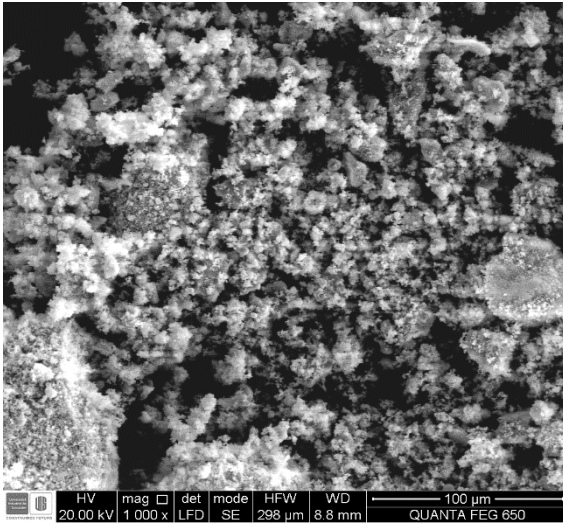
ANEXO C

Tabla 9. *Factor de emisión para distintos tipos de combustibles.*

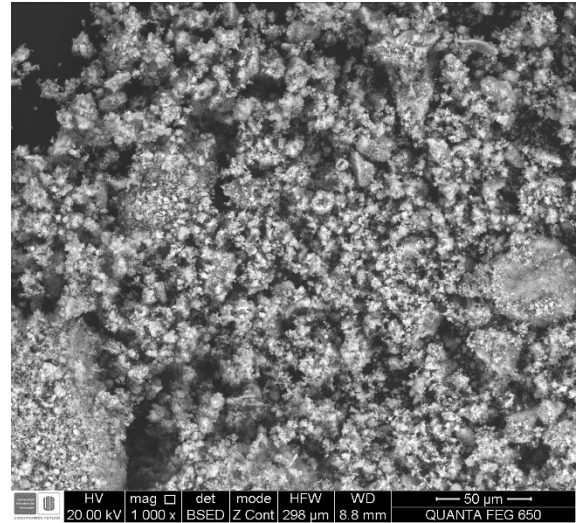
| Tipo de combustible | Kg de CO₂/Gal |
|----------------------------|---------------------------------|
| Gasolina de aviación | 8,31 |
| Biodiesel | 9,45 |
| Etanol | 5,75 |
| Metanol | 4,10 |
| Diesel | 10,21 |
| Gasolina para motor | 8,78 |
| Propano | 5,72 |

ANEXO D

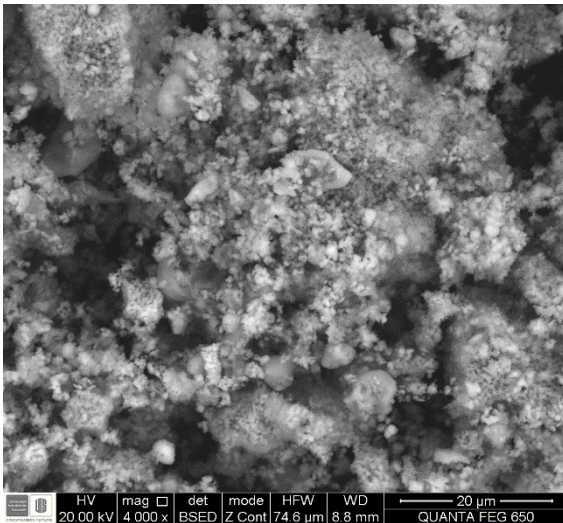
Figura 15. Microscopía electrónica de barrido (SEM) para la cal obtenida a condiciones operacionales de 1223,15 K, 60 minutos y tamaño de partícula -100. a. x1000 y 100 μm . b. x1000 y 50 μm . c. x4000 y 20 μm . d. x8000 y 10 μm .



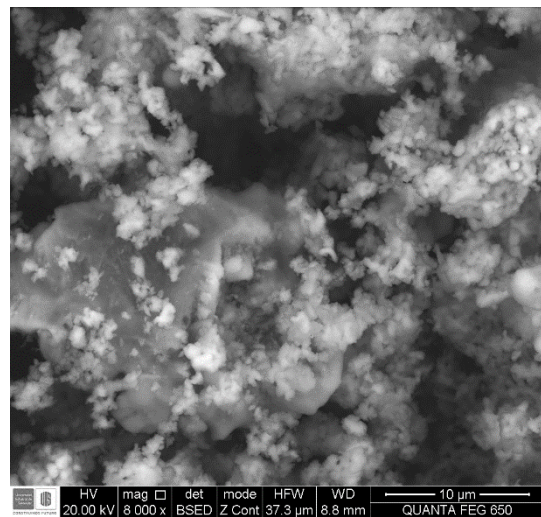
a



b



c.



d

ANEXO E

Tabla 10. Composición química de la calcinación hecha en el laboratorio a una temperatura de 1223,15 K, tiempo de 45 minutos y malla 100 pasante.

| FASE | PDF No. | NOMBRE | CUANTITATIVO | |
|-------------------|-------------------|-------------|-----------------|-------|
| Cristalino | $Ca(OH)_2$ | 010-87-0673 | Portlandita | 43,0% |
| | SiO_2 | 010-85-0796 | Cuarzo | 6,4% |
| | $Ca(CO)_3$ | 010-76-2712 | Calcita | 0,7% |
| | CaO | 010-77-9524 | Óxido de calcio | 47,1% |
| | MgO | 010-89-4248 | Periclusa | 0,8% |
| | $Ca(SiO_4)$ | 010-72-0503 | Anhidrita | N.C |
| | $Ca_2(Al_2SiO_7)$ | 010-77-1113 | Gehlenita | 2,0% |

Figura 16. Difractograma de la calcinación a 1223,15 K, 45 minutos y malla 100 pasante .

