

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA EN UNA PLANTA DE BENEFICIO  
DE MINERALES DE YESO EN SANTANDER**

**MARIA FERNANDA BELTRÁN ROMERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA EN UNA PLANTA DE BENEFICIO  
DE MINERALES DE YESO EN SANTANDER**

**MARIA FERNANDA BETRÁN ROMERO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO METALÚRGICO**

**Director**

**WALTER PARDAVÉ LIVIA**

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA METALÚRGICA**

**Codirector**

**PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA**

**DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*A Dios, por darme la oportunidad de culminar este proceso formativo y colocarme en gracia con tantas personas que me apoyaron.*

*A mi abuelo Juan de Jesús, quien es y siempre será mi recuerdo más feliz.*

*A mi madre Luz Dary, por impulsarme y darme aliento cuando sentía que no podría.*

*A mi padre Carlos Manuel, por apoyarme y desearme lo mejor siempre.*

*A mi familia que a pesar de tantos inconvenientes que se me presentaron, siempre creyeron en mí.*

*A mis compañeros por estar siempre ahí y aportar a mi enriquecimiento como persona.*

*A todas aquellas personas que creyeron que no lo lograría.*

*Ma. Fernanda Beltrán Romero*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por todos los conocimientos recibidos durante mi estadía como estudiante y brindarme la oportunidad de culminar el programa.

Al ingeniero Walter Pardavé Livia, director del proyecto y docente de la escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por su confianza y constante dedicación que me ofreció, por sus conocimientos y apoyo para la realización de este proyecto.

Al PH.D Pedro Luis Delvasto y en especial al PH.D Mauricio Rincón, docentes de la escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales quienes creyeron en mí y me ofrecieron su apoyo incondicional.

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

A los laboratorios de Microscopía y Rayos X de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará por permitirme el uso de sus equipos para realizar pruebas para el proyecto.

A Luis Enrique Rodríguez Soto, gerente de Cinecolombia multiplex cacique, por colaborarme con la organización de mis horarios laborales y disponer de tiempo para la realización del proyecto.

A todos los docentes de la escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales quienes con sus conocimientos ofrecidos en el transcurso de la carrera me hicieron crecer como persona y como profesional.

A toda mi familia y en especial a mi tío Alfredo Beltrán Hernández, que siempre estuvieron apoyándome para culminar mis estudios de pregrado.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 ANTECEDENTES	19
2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.3 EL YESO	20
2.4 HUELLA DE CARBONO	21
2.5 FÓRMULA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO	23
2.6 FÓRMULA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA	24
3. METODOLOGÍA	27
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA E INDAGACIÓN DE ANTECEDENTES	28
3.2 RECONOCIMIENTO Y VISITA A LA PLANTA	28
3.3 RECORRIDO POR LAS INSTALACIONES, OBSERVACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE LA PLANTA Y ENTREVISTA CON PERSONAL ADMINISTRATIVO	29
3.4 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES QUE GENERAN GEI ESPECIALMENTE EN HORNO DE CALCINACIÓN	29
3.5 MUESTREO DE MATERIA PRIMA (YESO) Y ANÁLISIS DETALLADO DEL CARBÓN USANDO PROCEDIMIENTO ASTM D388	30
3.6 DESARROLLO EXPERIMENTAL, DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE LA HUELLA ECOLÓGICA DE LA PLANTA	30
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN UTILIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	31
4.2 APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE OSTWALD	32

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL DE YESO Y EL YESO PRODUCIDO POR CALCINACIÓN POR LA PLANTA	35
4.4 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	37
4.5 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL CONSUMO ENERGÉTICO	38
4.6 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO PRODUCIDA POR LOS VEHÍCULOS	39
4.7 CANTIDAD DE CO <sub>2</sub> PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN	39
4.8 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO TOTAL	40
4.9 BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	41
4.10 BALANCE DE ENERGÍA DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	42
5. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HIDRICA DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	44
6. CONCLUSIONES	46
7. RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFIA	49
ANEXOS	50

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología GhG Protocol para el cálculo de la HC	22
Figura 2. Metodología usada en el desarrollo del proyecto	27
Figura 3. Visita general de Inyesa LTDA	28
Figura 4. Horno de calcinación Inyesa LTDA	29
Figura 5. Mina de yeso del municipio de Los Santos Santander	30
Figura 6. Diagrama de Sankey para balance de energía en la planta de beneficio de minerales de yeso	43

## LISTA DE GRAFICOS

	<b>Pág.</b>
Grafico 1. Cálculo de Schultes para la determinación de CO <sub>2</sub> máximo	33
Grafico 2. Diagrama de Ostwald para Carbón usado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso	34
Grafico 3. Diagrama de Ostwald para Carbón usado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso	35
Grafico 4. Balance de materia de la planta de beneficio de minerales de yeso.	42

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Resumen, caracterización carbón utilizado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso	31
Tabla 2. Clasificación general del carbón mineral, según norma ASTM D388-15	32
Tabla 3. Análisis elemental con microscopía electrónica de barrido para el mineral de yeso, a) muestra 1, b) muestra 2, c) muestra 3. Todas del mismo mineral	36
Tabla 4. Análisis elemental con microscopía electrónica de barrido para el yeso calcinado, a) muestra 1, b) muestra 2, c) muestra 3. Todas del mismo yeso calcinado	36
Tabla 5. Valores de consumo eléctrico de los equipos empleados en el procesamiento de minerales de yeso	37
Tabla 6. Consumo y tipo de combustible de los vehículos utilizados en la empresa yesera	37
Tabla 7. Emisiones de CO <sub>2</sub> de cada uno de los procesos de la planta de beneficio de minerales de yeso y total de emisiones	40
Tabla 8. Valores detallados de la huella hídrica de la planta de beneficio de minerales de yeso	44
Tabla 9. Resumen de huella ecológica de la planta de beneficio de minerales de yeso.	45

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN UTILIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO	51

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTIMACIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA DE UNA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO EN BUCARAMANGA. \*

**AUTOR:** Maria Fernanda Beltrán Romero\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de ciclo de vida, huella de carbono, huella hídrica, gases efecto invernadero.

### DESCRIPCIÓN

En la actualidad el tema del calentamiento global y los constantes esfuerzos de la humanidad por mitigar y controlar las emisiones generadas por la industria, son el tema principal en las juntas de gobierno, simposios científicos, congresos de ingenieros, etc., de las potencias mundiales. Esta iniciativa ha llevado a desarrollar distintos estudios de estimación del cálculo de la huella ecológica mediante análisis del ciclo de vida, midiendo las emisiones de los gases efecto invernadero en kilogramos equivalentes de CO<sub>2</sub> (huella de carbono) y los consumos de agua usados en cada uno de los procesos directos o indirectos que se realizan en las actividades propias de la empresa (huella hídrica).

En el siguiente trabajo, se realizó la estimación de la huella ecológica para una planta de beneficio de minerales de yeso ubicada en el barrio Café Madrid de la ciudad de Bucaramanga mediante el análisis de ciclo de vida. Para esto se visitó la planta y se tomaron muestras del mineral de yeso y del carbón para la caracterización. Con los consumos energéticos de la planta, se detectó el horno de calcinación como mayor foco de emisión de gases efecto invernadero (CO<sub>2</sub>). El valor estimado de la huella de carbono y la huella hídrica de la planta fue de 7334,991 Kg de  $\frac{CO_2}{día}$  y 820  $\frac{m^3}{día}$ , respectivamente; lo cual se considera aceptable.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Msc Walter Pardavé Livia. Codirector: PhD Pedro Luis Delvasto Angarita.

## ABSTRACT

**TITLE:** ESTIMATION OF THE ECOLOGICAL FOOTPRINT OF A PLANT FOR THE BENEFIT OF PLASTER MINERALS IN BUCARAMANGA. \*

**AUTHOR:** Maria Fernanda Beltrán Romero. \*\*

**KEYWORDS:** Life cycle analysis, carbon footprint, water footprint, greenhouse gases.

### DESCRIPCIÓN

Currently, the issue of global warming and the constant efforts of humanity to mitigate and control the emissions generated by the industry, are a major theme in the boards of government, scientific symposiums, congresses of engineers, etc., of the world powers. This initiative has led to the development of different studies to estimate the ecological footprint by analyzing the life cycle, measuring the emissions of greenhouse gases in kilograms equivalent of CO<sub>2</sub> (carbon footprint) and the water consumptions used in each one of the direct or indirect processes that are carried out in the company's own activities (water footprint).

In the following work, the estimation of the ecological footprint was made for a plant for the benefit of plaster minerals located in the Café Madrid neighborhood of the city of Bucaramanga through life cycle analysis. For this, the plant was visited and samples of gypsum ore and coal were taken for characterization. With the energy consumption of the plant, the calcination furnace was detected as the main focus of greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) emissions. The estimated value of the carbon footprint and water footprint of the plant was  $7334,991 \text{ Kg of } \frac{\text{CO}_2}{\text{day}}$  and  $820 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$ , respectively; which is considered acceptable.

---

\* Degree Project

\*\* Faculty of Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Msc Walter Pardavé Livia. Co-director: PhD Pedro Luis Delvasto Angarita.

## INTRODUCCIÓN

La huella ecológica es un indicador del impacto ambiental generado por la demanda humana que hay de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, y se relaciona con la capacidad ecológica de la tierra para regenerar sus recursos.

En los años 60, y a causa del notorio deterioro de los recursos ambientales en el planeta, nace la necesidad de evaluar las causas que generan este decremento, de este modo se inician estudios referentes como el análisis del ciclo de vida (ACV) en este se investiga y evalúan los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida. Para esa fecha el análisis estaba centrado en el cálculo del consumo energético necesario para la producción de sustancias químicas intermedias y finales.

Posteriormente, como consecuencia de las predicciones de aumento de la población (lo que hizo prever un incremento de la demanda de recursos materiales y energéticos) y, sobre todo, a partir de la crisis del petróleo de los años setenta, se llevaron a cabo gran número de estudios más detallados encaminados, sobre todo, a la gestión óptima de los recursos energéticos. Dado que para estos estudios había que tener en cuenta los balances de materia del proceso, fue necesario incluir en ellos el consumo de materias primas y la generación de residuos.<sup>1 2</sup>

Con base en la realidad antes planteada, en el presente proyecto se estimó la huella ecológica de una planta de beneficio de minerales de yeso en Bucaramanga, mediante el análisis ciclo de vida (huella de carbono y huella hídrica) con el objetivo

---

<sup>1</sup> Chacon VArgas , Jairo Raul. «Historia ampliada y comentada del análisis del ciclo de vida (ACV) con una bibliografía selecta.» 2008.

<sup>2</sup> Acevedo Rincon , Luz Helena . «Caracterización de la huella de carbono de la operación del campo escuela colorado.» Bucaramanga , 2016.

de determinar alternativas para que éste impacto disminuya y mejorar la eco eficiencia de dicha instalación industrial.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Estimar la huella ecológica de una planta de beneficio de minerales de yeso en Bucaramanga mediante análisis de ciclo de vida.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el carbón y el mineral de yeso usado en los procesos de la planta de beneficio de minerales de yeso.
- Identificar emisiones y vertidos de la planta de beneficio de minerales de yeso.
- Determinar la huella de carbono y la huella hídrica de la planta de beneficio de minerales de yeso mediante análisis de ciclo de vida.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES

El yeso es uno de los más antiguos materiales empleado en construcción. En el período Neolítico, y debido a la sedentarización, comenzó a elaborarse yeso calcinando aljez, y se utilizaba para unir las piezas de mampostería, sellar las juntas de los muros y para revestir los paramentos de las viviendas, sustituyendo al mortero de barro. En la antigua Jericó, en el milenio VI a. C., se usó yeso moldeado. En el Antiguo Egipto, durante el tercer milenio a. C., se empleó yeso para sellar las juntas de los bloques de la Gran Pirámide de Guiza, y en multitud de tumbas como revestimiento y soporte de bajorrelieves pintados. El palacio de Cnosos contiene revestimientos y suelos elaborados con yeso.<sup>3</sup>

En Colombia se han descubierto depósitos de una gran cantidad de minerales, pero el yeso en especial representa un elemento importante en la economía del departamento de Santander.

La producción de minerales del departamento de Santander proviene principalmente de los municipios de Vetas y California, en oro y plata, en carbón de El Carmen y Landázuri, en yeso de Los Santos, Villanueva, Zapatoca y Capitanejo, y en materiales de construcción de San Gil, Betulia, Piedecuesta, Gámbita, Girón, Barichara, Barrancabermeja, Capitanejo y Oiba.

Entre 2013 y el tercer trimestre de 2016 la participación de Santander en la producción de oro del país fue de 0,21%, en la producción de plata fue de 0,10%, en la producción de platino fue de 0,01%, en la producción de carbón fue de 0,12%,

---

<sup>3</sup> Echeverría Belmonte, Elia Ruth. «Elaboración y evaluación de la resistencia mecánica de un material a base de Yeso y Zeolita.» Mexico, 2011.

en la producción de yeso fue de 99,1% y en la producción de materiales de construcción fue de 5,85%. Por tanto, el 42,7% de las regalías del departamento proviene de la explotación de yeso, mientras que el 28,6% de carbón, el 15,5% de metales preciosos, el 11,2% de materiales de construcción y el 2% de otros minerales. Todo lo anterior, según datos suministrados por la agencia nacional de minería del departamento de Santander.<sup>4</sup>

## 2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A través de este estudio de la huella ecológica y huella de carbono se pretende dar un acercamiento holístico de impacto ambiental de una planta de producción de yeso en el área de Santander, para ello es necesario entender todos los procesos que conllevan a la fabricación de yeso para uso en la industria; y además las normativas, todo en pro de aportar al desarrollo de un modelo sostenible para la extracción, selección, refinamiento y uso final del mineral de yeso en la actividad humana.

## 2.3 EL YESO

El yeso es un conglomerante no estable en presencia de humedad, constituido por sulfato de calcio con dos moléculas de agua,  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ .<sup>5 6</sup>

Comercialmente, el yeso se distribuye como una mezcla de varios tipos de yeso, libres o parcialmente libres de humedad (según la temperatura usada en el proceso

---

<sup>4</sup> Agencia Nacional de Minería . <https://www.anm.gov.co>. 19 de Enero de 2017. [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets\\_santander\\_23-01-2017.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_santander_23-01-2017.pdf). (último acceso: 2 de Septiembre de 2017).

<sup>5</sup> Pardave , Walter . «Programa de Control de emisiones para la Industria Yesera Convencional.» *Esaica* 1, n° 1 (2015): 66-69.

<sup>6</sup> Otero Villarino , Alberto . <http://ocw.usal.es>. 2 de Mayo de 2017. <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%203%20-%20EL%20YESO.pdf>. (último acceso: 2 de Septiembre de 2017).

de calcinación), se extrae y procesa según los siguientes pasos usados en la planta en estudio:

1. Extracción del mineral y acarreo
2. Recepción en planta de trituración
3. Trituración primaria y molienda
4. Calcinación en horno
5. Proceso enfriamiento
6. Remolienda
7. Clasificación y envasado
8. Comercialización

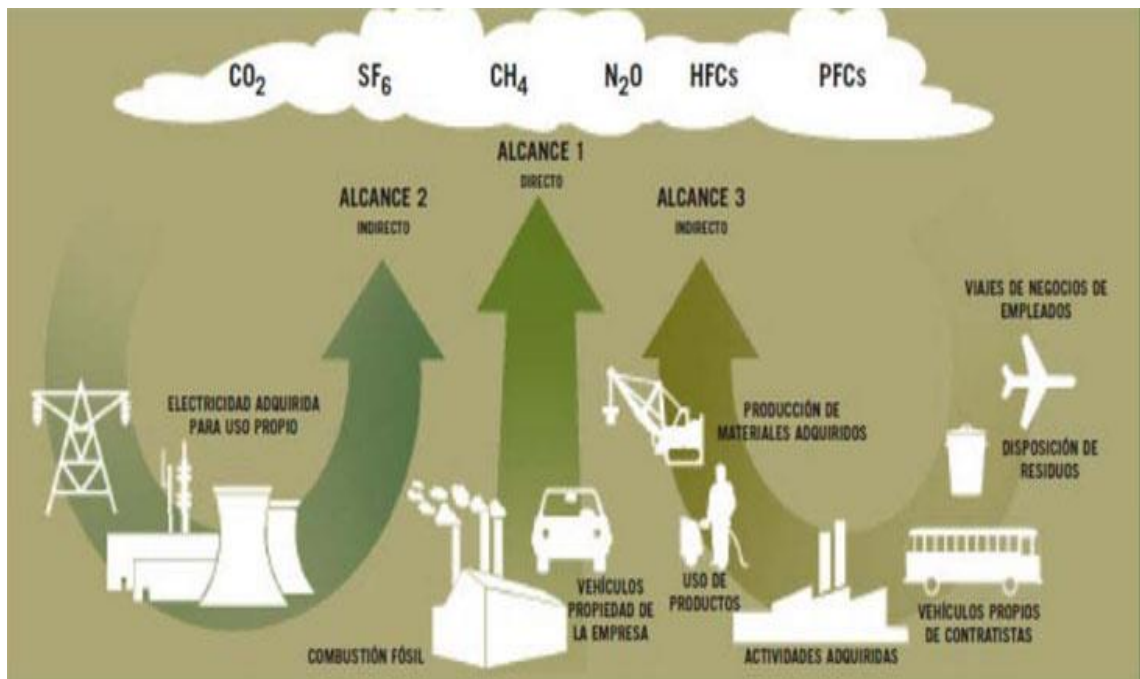
## **2.4 HUELLA DE CARBONO**

La huella de carbono (HC) es un parámetro utilizado para cuantificar las emisiones hacia la atmósfera de los gases efecto invernadero (GEI) tales como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CFC, generados por el desarrollo de alguna actividad con el objetivo de determinar su influencia sobre el cambio climático evidenciado en la zona, los alrededores o el medio ambiente en general. El cálculo de la HC da como resultado un dato, el cual puede ser utilizado como indicador ambiental, con el que se da un punto de referencia, para establecer si es necesario implementar un plan inmediato de reducción tanto de emisiones como de consumo de energía. La importancia del cálculo de la HC en las industrias, en general se hace cada vez mayor, debido a

que este procedimiento le ayuda a la empresa a distinguirse dentro de un mercado que está cada vez más concientizado con la protección del medio ambiente, y en donde se valora preferiblemente la elaboración de productos sostenibles y eco-amigables. Para realizar el cálculo de la HC existen diversas normas de guía dentro de las cuales podemos encontrar:

**GhG Protocol.** Es una iniciativa puesta en marcha por el World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), apoyada además por numerosas empresas, organizaciones no gubernamentales y administrativas públicas. El Greenhouse Gas Protocol (GhG Protocol) provee una guía para empresas interesadas en realizar un inventario de emisiones, teniendo en cuenta el tipo de emisión de cada etapa del proceso (energética, productiva o por transporte), su contribución y la cantidad arrojada a la atmósfera en términos de Kg de CO<sub>2</sub> equivalente como se muestra en Figura 1.

Figura 1. Metodología GhG Protocol para el cálculo de la HC



Fuente: Guía GhG Protocol. 2006

El cálculo de la HC debe cumplir con ciertos principios tales como: la relevancia (refleja de manera apropiada todas las emisiones de GEI de las que la empresa ha sido responsable), integridad (cuando todas las fuentes de emisión identificadas están contabilizadas), consistencia (cuando se usan metodologías que permitan comparaciones de las emisiones a lo largo del tiempo), transparencia (cuando la información es presentada y publicada de forma clara, efectiva y comprensible, basada en documentación sólida, transparente y auditable) y precisión (contar con datos reales sin errores sistemáticos o desviaciones logrando una incertidumbre mínima).<sup>7</sup>

## 2.5 FÓRMULA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO

En los últimos años, la HC sólo ha surgido en el dominio público como una descripción bastante general de la emisión de gases de efecto invernadero totales, asociados con la actividad humana.<sup>8</sup>

Sin embargo, el análisis de huella de carbono, es un indicador ambiental global de una actividad, que busca reducir el consumo de energía. A través del ejercicio del cálculo de la huella de carbono se identifican todas las fuentes de emisiones de GEI y se obtiene el dato global de impacto de la actividad.<sup>9</sup>

Así, se calcula que 1 kilogramo (kg) de metano (CH<sub>4</sub>) tiene un efecto sobre el calentamiento global equivalente a 25 kg de CO<sub>2</sub>. También se han establecido otras

---

<sup>7</sup> Ariza Santamaria , Carlos Augusto , y Catalina Gualdrón Ordoñez . «Estimación de la huella de carbono Hc mediante inventario de emisiones en la empresa "Ladrillera Versailles" .» Bucaramanga, 2016.

<sup>8</sup> Sanabria Gamboa , Andrés Felipe , y Robinson Velásquez . «Determinación de la huella de carbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyacá .» Bucaramanga , 2013.

<sup>9</sup> Jiménez Herrero , Luis M , José Luis De la Cruz Leiva , y Mónica Chao Janeiro . «<http://www.mapama.gob.es>.» 2 de Mayo de 2017. [http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual\\_comercios\\_final\\_tcm7-230140.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual_comercios_final_tcm7-230140.pdf). (último acceso: 20 de Octubre de 2017).

estandarizaciones, como, por ejemplo, que 1 kg de NO<sub>2</sub> tiene un efecto sobre el calentamiento global igual a 298 kg de CO<sub>2</sub>.

La fórmula general para el cálculo de la huella de carbono es:

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 = \text{Factor de emisión} * \text{Cantidad} \quad (1)$$

La anterior expresión indica que la cantidad de contaminantes producidos en el proceso por la empresa, multiplicado por un factor de emisión, que se encuentra en los documentos de la agencia de protección ambiental de los estados unidos, permitirá establecer el equivalente de kilogramos en CO<sub>2</sub><sup>10 11 12</sup>

## 2.6 FÓRMULA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

Se define como el “volumen total de agua dulce consumida directa e indirectamente por una nación o una empresa, o en la provisión de un producto o servicio”.

La huella hídrica (HH) de una unidad es la suma de la HH de cada una de las actividades en las que se requieren consumos de agua, que existen dentro de esta unidad de producción.<sup>13</sup>

$$HH \text{ Unidad} = HH \text{ Administrativa} + HH \text{ operativa} + HH \text{ Servicios} \quad (2)$$

---

<sup>10</sup> Sanabria Gamboa , Andres Felipe , y Robinson Velasquez . «Determinaciona de la huella de crbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyaca .» Bucaramanga , 2013.

<sup>11</sup> Jimenez Herrero , Luis M , Jose Luis De la Cruz Leiva , y Monica Chao Janeiro . «[http://www.mapama.gob.es.](http://www.mapama.gob.es)» 2 de Mayo de 2017. [http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual\\_comercios\\_final\\_tcm7-230140.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual_comercios_final_tcm7-230140.pdf). (último acceso: 20 de Octubre de 2017).

<sup>12</sup> Empresa Conservacion y Carbono S.A.S "Conservacion y Corbono S.A.S . «[http://www.conservacionycarbono.com.](http://www.conservacionycarbono.com)» 5 de Mayo de 2017. <http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso14040>. (último acceso: 1 de Octubre de 2017).

<sup>13</sup> Water Footprint Network. «Manual para la evaluacion de la huella hidrica .» 2016.

La HH de una actividad es el resultado de la sumatoria de las HH evaluadas.

Considerando las 4 HH, la ecuación sería la siguiente:

$$HH \text{ Actividad} = HH \text{ Azul} + HH \text{ Gris} + HH \text{ Verde} + HH \text{ Indirecta} \quad (3)$$

La huella hídrica de un producto se descompone en tres elementos:

**Azul:** Es el volumen de agua dulce extraída de un cuerpo de agua superficial o subterránea y que es evaporada en el proceso productivo o incorporada en un producto.

$$HH \text{ Azul} = \text{Incorp} + \text{Evap}; \quad HH \text{ Azul} = \text{Actividad evaluada} - \text{agua calculada} \quad (4)$$

**Verde:** Es el volumen de agua de precipitación que es evaporada en el proceso productivo o incorporada en un producto.

$$HH \text{ Verde} = HH \text{ Verde}_{\text{pasto}} + HH \text{ Verde}_{\text{Arbustos}} + \dots + HH \text{ Verde}_N \quad (5)$$

**Gris:** Es el volumen de agua contaminada, que puede ser cuantificada como el volumen de agua requerida para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad del agua esté sobre los estándares aceptables<sup>14 15</sup>.

$$HH \text{ Gris} = \frac{(vol_{efl} * C_{efl}) - (vol_{afl} * C_{afl})}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (6)$$

---

<sup>14</sup> Sanabria Gamboa , Andres Felipe , y Robinson Velasquez . «Determinaciona de la huella de crbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyaca .» Bucaramanga , 2013.

<sup>15</sup> Comision Permanente del Pacifico Sur. «Línea Base del Conocimiento Regional sobre las Implicancias de la Huella de Carbono en los Procesos de Toma de Decisiones.» Vol. 2. 2014.

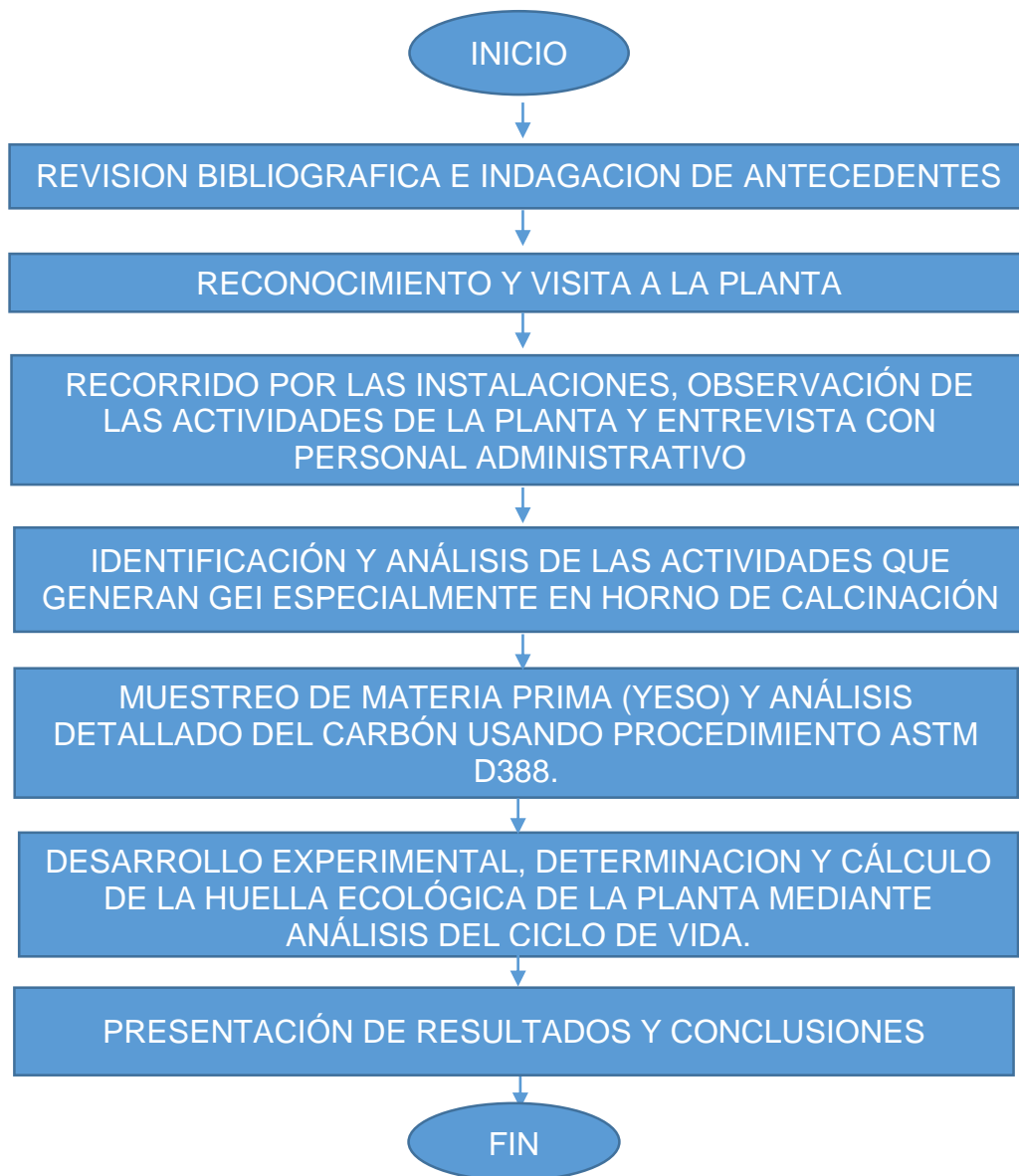
**Indirecta:** Agua necesaria para producir las diferentes materias primas utilizadas en el proceso (productos de la cadena de suministros).

$$HH \text{ Indirecta} = \sum_p (C_p * HH_{prod}) \quad (7)$$

### 3. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología usada en el desarrollo del proyecto, para alcanzar los objetivos propuestos para estimar la huella ecológica en una planta de beneficio de minerales de yeso en Bucaramanga:

Figura 2. Metodología usada en el desarrollo del proyecto



### **3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA E INDAGACIÓN DE ANTECEDENTES**

Se realizó la debida revisión de textos, proyectos de grado, normas, recursos electrónicos, publicaciones de revistas científicas, entre otras; las cuales proporcionaron la información relacionada con las materias primas, huella de carbono y huella hídrica.

### **3.2 RECONOCIMIENTO Y VISITA A LA PLANTA**

Se realizó la visita a la planta (INYESA S. A) bajo la autorización del personal administrativo, con el fin de conocerla e identificar los procesos que se llevan a cabo. En esta planta se produce yeso para estuco. La figura 3 muestra las instalaciones de la planta industrial.

Figura 3. Visita general de Inyesa LTDA



Fuente: Reporte de la empresa. 2015

### **3.3 RECORRIDO POR LAS INSTALACIONES, OBSERVACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE LA PLANTA Y ENTREVISTA CON PERSONAL ADMINISTRATIVO**

Se realizó el recorrido y con ayuda del personal a cargo de cada proceso fue posible entender las actividades que realizan. En la figura 4 se observa uno de los procesos de la planta, (horno de calcinación).

Figura 4. Horno de calcinación Inyesa LTDA



Fuente: Reporte de la empresa. 2015

### **3.4 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES QUE GENERAN GEI ESPECIALMENTE EN HORNO DE CALCINACIÓN**

Con el conocimiento de los procesos realizados por la planta fue posible identificar los focos de generación de GEI como lo es el horno de calcinación.

### **3.5 MUESTREO DE MATERIA PRIMA (YESO) Y ANÁLISIS DETALLADO DEL CARBÓN USANDO PROCEDIMIENTO ASTM D388**

Se tomaron muestras del yeso (directamente de la mina en los Santos Santander como se muestra en la figura 5 y del carbón y se realizó la caracterización y cálculo de los equivalentes de CO<sub>2</sub>, se realizó la debida caracterización como lo denota el estándar ASTM D388.

Figura 5. Mina de yeso del municipio de Los Santos Santander



Fuente: Reporte de la empresa. 2015

### **3.6 DESARROLLO EXPERIMENTAL, DETERMINACIÓN Y CÁLCULO DE LA HUELLA ECOLÓGICA DE LA PLANTA**

Con los datos y cálculos realizados se procedió a calcular la huella de carbono y la huella hídrica para estimar la huella ecológica de la planta de beneficio de minerales de yeso.

## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN UTILIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO

Para la caracterización del carbón utilizado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso se empleó bibliografía y datos de la empresa yesera. A continuación, se presenta un resumen de la caracterización:

Tabla 1. Resumen, caracterización carbón utilizado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso

Caracterización	Porcentaje
% Carbón total	44 %
% Hidrógeno	4,93 %
% Nitrógeno	1,525 %
% Humedad	1,048 %
% Cenizas	9,785 %
% Materia volátil	36,6335 %
Índice de hinchamiento	2,5
Poder calorífico	7328,916 kcal * kg
% Azufre	1,1263 %
% Carbón fijo	47,4665 %

Existen varias clasificaciones de los carbones según sus características químicas. Una de las más utilizadas divide a los carbones de mayor a menor en: antracita, bituminoso bajo en volátiles, bituminoso medio en volátiles, bituminoso alto en volátiles, sub-bituminoso, lignito y turba. La hulla es un carbón mineral de tipo bituminoso medio y alto en volátiles. En cuanto a los parámetros, estos también pueden variar de una clasificación a otra, aunque unos valores promedio podrían ser los que figuran en la siguiente tabla, que corresponde a la **American Society**

**for Testing and Materials (ASTM D-388)<sup>16</sup>**, que lo divide en las cuatro clases nombradas anteriormente con base en las propiedades referidas a la composición de los vegetales y las condiciones de presión y temperatura a que fueron sometidos durante su formación en relación al porcentaje de carbón fijo, materia volátil y poder calorífico. Ver tabla 2.

Tabla 2. Clasificación general del carbón mineral, según norma ASTM D388-15

<b>TIPO DE CARBÓN</b>	<b>CARBÓN FIJO (%)</b>	<b>MATERIA VOLÁTIL (%)</b>	<b>PODER CALORÍFICO (kcal/kg)</b>
Antracita	86 - 98	(2 - 14)	
Bituminoso (hulla)	69 - 78	(14 - 31)	5800 - 7780
sub - bituminoso			5290 - 5860
Lignito y turba			3500 - 4600

Fuente: norma ASTM D388-15. A. S. F. T. A. MATERIALS, «Standard Classification of Coals by Rank,» 2015.

En la Tabla 1. , se observa un resumen\* de la caracterización realizada al carbón utilizado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso; de ahí se observa según la norma ASTM D388 que el carbón es bituminoso alto en volátiles tipo A.

\*Detalle de la caracterización se puede revisar en el anexo 1

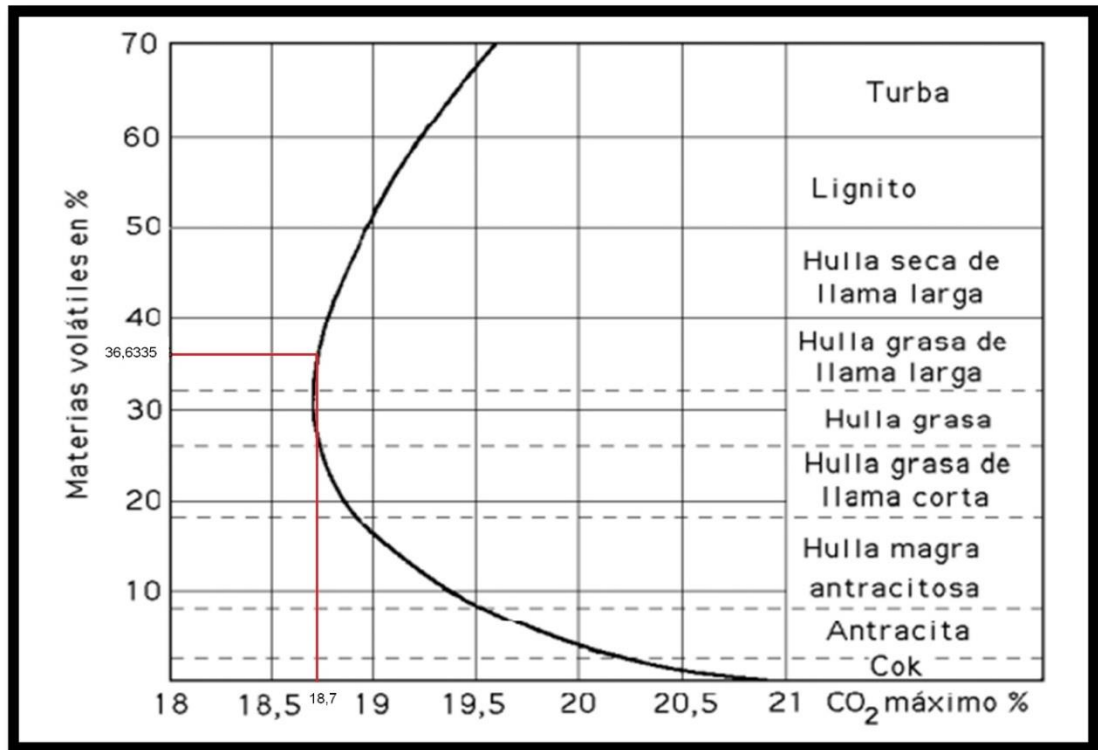
## **4.2 APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE OSTWALD**

Para la construcción del diagrama de Ostwald, se tiene como referencia el porcentaje de materia volátil para el cálculo del porcentaje de CO<sub>2</sub> máximo, como se muestra en la Grafico 1. Cálculo de Schultes para la determinación de CO<sub>2</sub>

<sup>16</sup> American Society For Testing and Materials . «Standard Classification of Coals by Rank .» 2015.

máximo usando el valor cuantificado de materia volátil del carbón usado en la calcinación del mineral de yeso.

Grafico 1. Cálculo de Schultes para la determinación de CO<sub>2</sub> máximo



Fuente: Determinación de la huella de carbono de la empresa ladrillos el zipa paipa Boyacá, mediante análisis de ciclo de vida. 2016. Modificado por autor. A. F. S. Gamboa y R. V. Velásquez, «Determinación de la huella de carbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyacá, mediante análisis de ciclo de vida,» Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Bucaramanga, 2013.

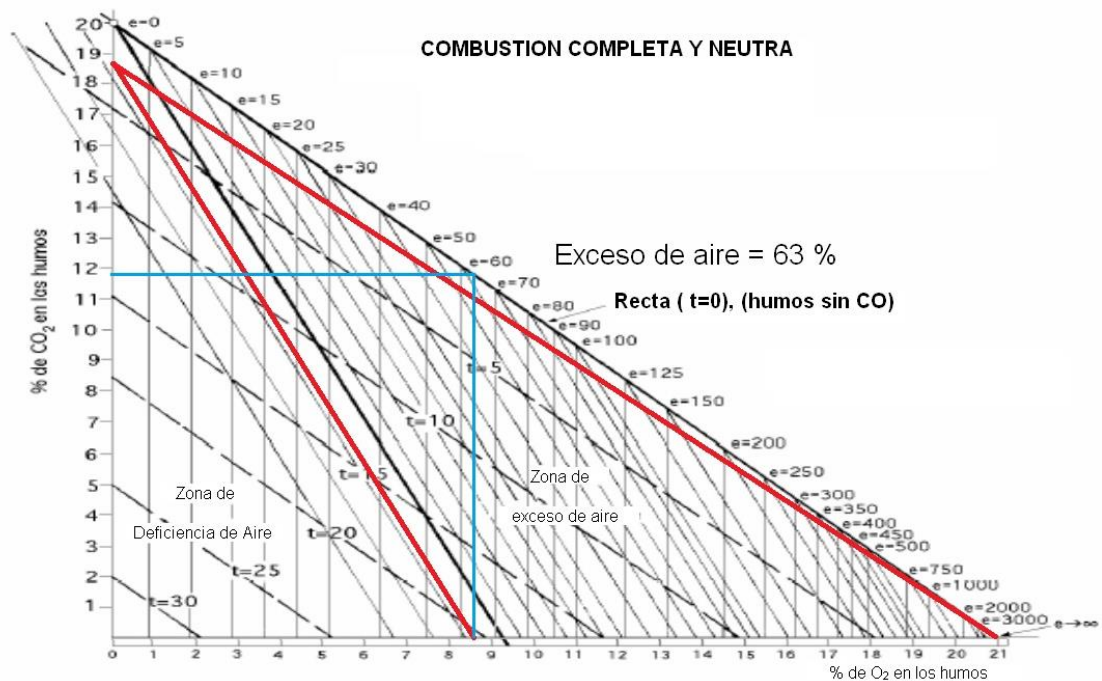
De la grafico 2. Se pudo calcular el porcentaje máximo de CO<sub>2</sub> usando como referencia 36.6335 % de materia volátil en combustión normal se genera un máximo de 18.7% de CO<sub>2</sub>.

Con base en lo anterior, y teniendo en cuenta que el valor máximo de O<sub>2</sub> es 21%, se puede graficar el triángulo de Ostwald, así:

$$n = \frac{\% \text{ Máximo de } CO_2}{2 + (\% \text{ Máximo de } CO_2/100)} \quad (8)$$

$$n = \frac{18.7}{2 + (18.7/100)} = 8.55 \%$$

Grafico 2. Diagrama de Ostwald para Carbón usado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso

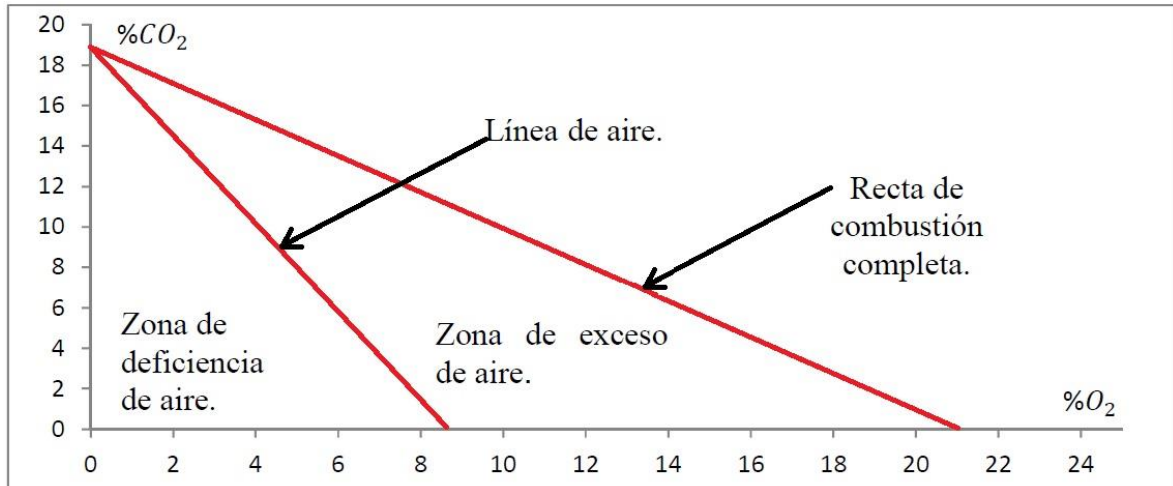


Fuente: Determinación de la huella de carbono de la empresa ladrillos el zipa paipa Boyacá, mediante análisis de ciclo de vida. 2016. Modificado por autor. A. F. S. Gamboa y R. V. Velásquez, «Determinación de la huella de carbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyacá, mediante análisis de ciclo de vida,» Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fiscoqumicas, Bucaramanga, 2013.

De la grafico 2 y Grafico 3 se puede apreciar cuales son las zonas de deficiencia del aire y las zonas de exceso de aire.

Con el porcentaje de  $\text{CO}_2$  máximo y los valores de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  expulsados en el horno, se afirma que la combustión es completa, llevándose a cabo con un 63% de aire en exceso.

Grafico 3. Diagrama de Ostwald para Carbón usado en la combustión en la planta de beneficio de minerales de yeso



#### 4.3 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL DE YESO Y EL YESO PRODUCIDO POR CALCINACIÓN POR LA PLANTA

Para la caracterización del mineral de yeso y el producto final, se realizó análisis de microscopía electrónica de barrido

Tabla 3. Análisis elemental con microscopía electrónica de barrido para el mineral de yeso, a) muestra 1, b) muestra 2, c) muestra 3. Todas del mismo mineral

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	09.44	16.44
<i>O</i>	42.46	55.50
<i>Mg</i>	00.39	00.33
<i>Al</i>	00.67	00.52
<i>Si</i>	00.78	00.58
<i>S</i>	19.20	12.52
<i>Ca</i>	26.95	14.06
<i>Fe</i>	00.13	00.05

a)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	10.07	17.62
<i>O</i>	38.60	50.71
<i>Mg</i>	04.75	04.11
<i>Al</i>	02.18	01.70
<i>Si</i>	04.15	03.11
<i>S</i>	13.09	08.58
<i>K</i>	00.31	00.16
<i>Ca</i>	26.38	13.83
<i>Fe</i>	00.47	00.18

b)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	17.50	28.89
<i>O</i>	36.69	45.48
<i>Na</i>	00.12	00.10
<i>Mg</i>	00.65	00.53
<i>Al</i>	01.35	01.00
<i>Si</i>	02.53	01.78
<i>S</i>	15.31	09.47
<i>K</i>	00.60	00.30
<i>Ca</i>	24.95	12.34
<i>Fe</i>	00.30	00.11

c)

Tabla 4. Análisis elemental con microscopía electrónica de barrido para el yeso calcinado, a) muestra 1, b) muestra 2, c) muestra 3. Todas del mismo yeso calcinado

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	06.34	11.91
<i>O</i>	37.51	52.92
<i>Mg</i>	00.98	00.91
<i>Al</i>	00.89	00.74
<i>Si</i>	02.27	01.82
<i>Sr</i>	00.55	00.14
<i>S</i>	19.20	13.51
<i>K</i>	00.41	00.23
<i>Ca</i>	31.03	17.47
<i>Ba</i>	00.00	00.00
<i>Fe</i>	00.82	00.33

a)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	04.53	11.60
<i>O</i>	23.95	46.07
<i>Mg</i>	00.30	00.38
<i>Al</i>	00.48	00.55
<i>Sr</i>	34.17	12.00
<i>S</i>	20.92	20.07
<i>K</i>	00.22	00.17
<i>Ca</i>	10.32	07.92
<i>Ba</i>	04.85	01.09
<i>Fe</i>	00.26	00.14

b)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	05.23	10.08
<i>O</i>	36.39	52.58
<i>Mg</i>	00.41	00.39
<i>Al</i>	00.51	00.44
<i>Si</i>	01.08	00.89
<i>S</i>	22.00	15.86
<i>K</i>	00.27	00.16
<i>Ca</i>	33.72	19.45
<i>Fe</i>	00.39	00.16

c)

En las y Tabla 4 se presenta el análisis elemental por microscopia electrónica de barrido para muestras las muestras de mineral de yeso y yeso calcinado respectivamente, en donde se puede observar alto contenido de calcio (Ca), oxígeno (O<sub>2</sub>) y azufre (S), elementos propios de la fórmula química del yeso; mientras que elementos como magnesio (Mg), el aluminio (Al), el potasio (P) y el hierro (Fe), entre otros, se encuentran en menor proporción tanto para el mineral de yeso como para el yeso calcinado por ser óxidos que acompañan al mineral .

En el anexo B se presenta el análisis detallado.

#### 4.4 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO

En la Tabla 5 se describen los valores de consumo eléctrico de los equipos empleados en el procesamiento de minerales de yeso.

Tabla 5. Valores de consumo eléctrico de los equipos empleados en el procesamiento de minerales de yeso

Procesos	Consumo [ Kwh ]
Trituración(Martillo)	3,015
Molino de bolas	4,986
Pre calentador	5,127
Horno calcinador	45,376
Enfriamiento	1,975
Empacado	0,456
Ciclón	1,456
Filtro de mangas	2,098

Fuente: Inyesa Ltda. 2017

En la tabla 5 se describe el consumo y tipo de combustible de los vehículos utilizados en la empresa yesera.

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

Cantidad	Tipo de vehículo	Tipo de combustible	Consumo [GPD]
1	Camioneta	Gasolina Corriente	3
2	Camiones	ACPM Diésel	9

Fuente: Inyesa Ltda. 2017

Con base en  $\text{Kg equivalentes de CO}_2 = \text{Factor de emisión} \times \text{Cantidad}$  (1), se realiza el cálculo del carbón equivalente para cada uno de los procesos como lo establece la Agencia de Protección Ambiental de los estados unidos de américa (EPA). Los factores usados para los combustibles se encuentran en el anexo C.

#### 4.5 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL CONSUMO ENERGÉTICO

Se tomó como base de cálculo un día completo dado que la empresa no especificó las horas exactas de operación de los equipos, porque su producción se da a razón de pedido solicitado por sus clientes.

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Trituración)} = 0,175737 \text{ Kg de CO}_2 * 3,015 \text{ Kwh}$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Trituración)/ dia} = 0,53 * 24 \text{ h} = 12,716$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Molino)} = 0,175737 \text{ Kg de CO}_2 * 4,986 \text{ Kwh}$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Molino)/dia} = 0,876 * 24 \text{ h} = 21,029$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Precalentador)} = 0,175737 \text{ Kg de CO}_2 * 5,127 \text{ Kwh}$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Precalentador)/ dia} = 0,9 * 24 \text{ h} = 21,624$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Horno)} = 0,175737 \text{ Kg de CO}_2 * 45,376 \text{ Kwh}$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Horno)/ dia} = 7,974 * 24 \text{ h} = 191,382$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Enfriamiento)} = 0,175737 \text{ Kg de CO}_2 * 1,975 \text{ Kwh}$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Enfriamiento)/ dia} = 0,347 * 24 \text{ h} = 8,33$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Empacado)} = 0,175737 \text{ Kg de CO}_2 * 0,456 \text{ Kwh}$$

$$\text{Kg equivalentes de CO}_2 \text{ (Empacado)/ dia} = 0,08 * 24 \text{ h} = 1,923$$

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (Ciclón) = 0,175737 Kg de CO<sub>2</sub> \* 1,456 Kwh*

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (Ciclón)/ dia = 0,256 \* 24 h = 6,141*

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub>(Filtro de mangas) = 0,175737 Kg de CO<sub>2</sub> \* 2,098 Kwh*

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (Filtro de mangas)/ dia = 0,369 \* 24 h = 8,849*

#### **4.6 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO PRODUCIDA POR LOS VEHÍCULOS**

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub>(Gasolina Corriente) = 8,78 Kg de CO<sub>2</sub> \*  $\frac{3 GPD}{G}$*

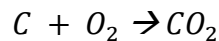
*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (Gasolina Corriente)/ dia = 26,34*

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (ACPM Diesel) = 10,21 Kg de CO<sub>2</sub> \*  $\frac{9 GPD}{G}$*

*Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (ACPM Diesel)/ dia = 91,89*

#### **4.7 CANTIDAD DE CO<sub>2</sub> PRODUCIDA POR LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN**

Para la combustión del carbón se tiene la siguiente ecuación química:



Suponiendo que se presenta una combustión completa y considerando los datos suministrados por la empresa: la cantidad de carbón utilizado es de cinco

toneladas/día; la eficiencia del horno es del 80% y el porcentaje de carbón fijo es del 47,4665 %; se tiene lo siguiente:

$$5000000 \text{ g de C / día} * \frac{1 \text{ mol de C}}{12 \text{ g de C}} * \frac{1 \text{ mol de CO}_2}{1 \text{ mol de C}} * \frac{44 \text{ g CO}_2}{1 \text{ mol de CO}_2} * 0,8 * 0,47466$$

$$\text{Kg de CO}_2 \text{ emitidos / día} = 6961,680$$

#### 4.8 CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO TOTAL

Se suma todos los valores de emisiones de CO<sub>2</sub> calculados anteriormente para cada proceso de la planta de beneficio de minerales de yeso, así:

Tabla 7. Emisiones de CO<sub>2</sub> de cada uno de los procesos de la planta de beneficio de minerales de yeso y total de emisiones

Procesos	Cantidad de CO <sub>2</sub> [ Kg / día]
Trituración(Martillo)	12,716
Molino de bolas	21,029
Precaletador	21,624
Horno calcinador	191,382
Enfriamiento	8,33
Empacado	1,923
Ciclón	6,141
Filtro de mangas	8,849
Camioneta (1)	26,34
Camiones (2)	91,89
CO <sub>2</sub>	6961,68
Total	7334,991

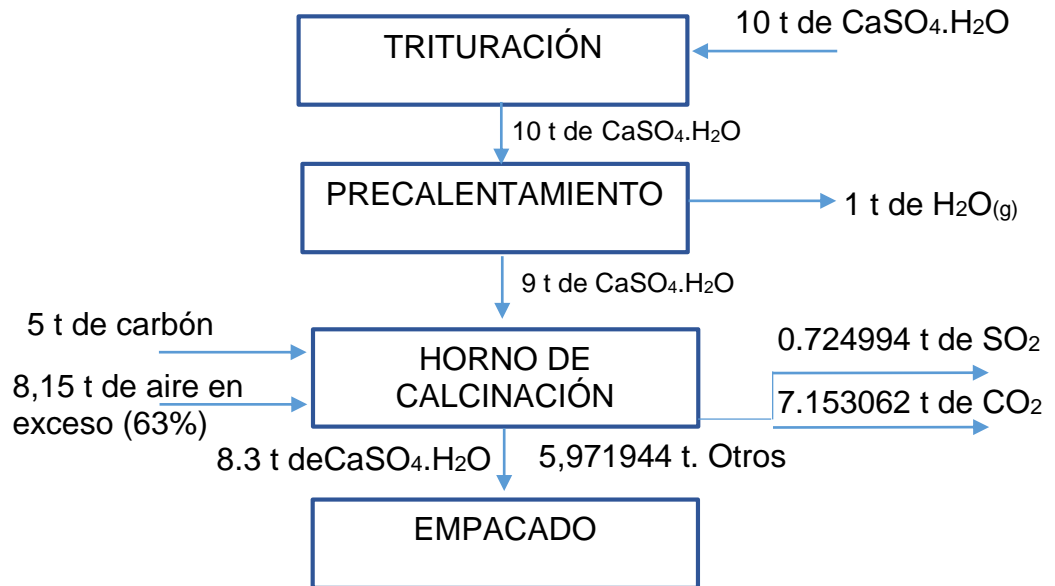
Para un mejor análisis medio ambiental de las emisiones generadas por la planta de beneficio de minerales de yeso, se realiza la conversión a unidades de masa sobre cantidad de carbón usado por año. De la información suministrada por la empresa se conoce que consumen 5 t/día de carbón y el tiempo promedio del horno de calcinación es de 20 horas por semana. El valor de la huella de carbono de la

planta industrial es 7,33 t de equivalente de CO<sub>2</sub>/t. Para analizar el impacto ambiental que tiene la planta industrial, se realizó una conversión a t de CO<sub>2</sub>/año y se obtuvo una producción de 1270,533 t de CO<sub>2</sub>/año, la cual según la organización de las naciones unidas (ONU) es aceptable, debido a que representa el 1,57 % de las emisiones permitidas en Colombia (80976 t de CO<sub>2</sub>/año, totales en la industria) aunque puede ser aún menor si se mejoran las condiciones de operación del horno de calcinación, con la evaluación de variables como el tamaño de partícula del mineral o la temperatura del proceso, por ejemplo.

#### **4.9 BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO**

Con los datos suministrados por la empresa y los cálculos realizados anteriormente, se realiza el balance de masa de la producción de yeso en la planta industrial como se muestra en la grafico 4.

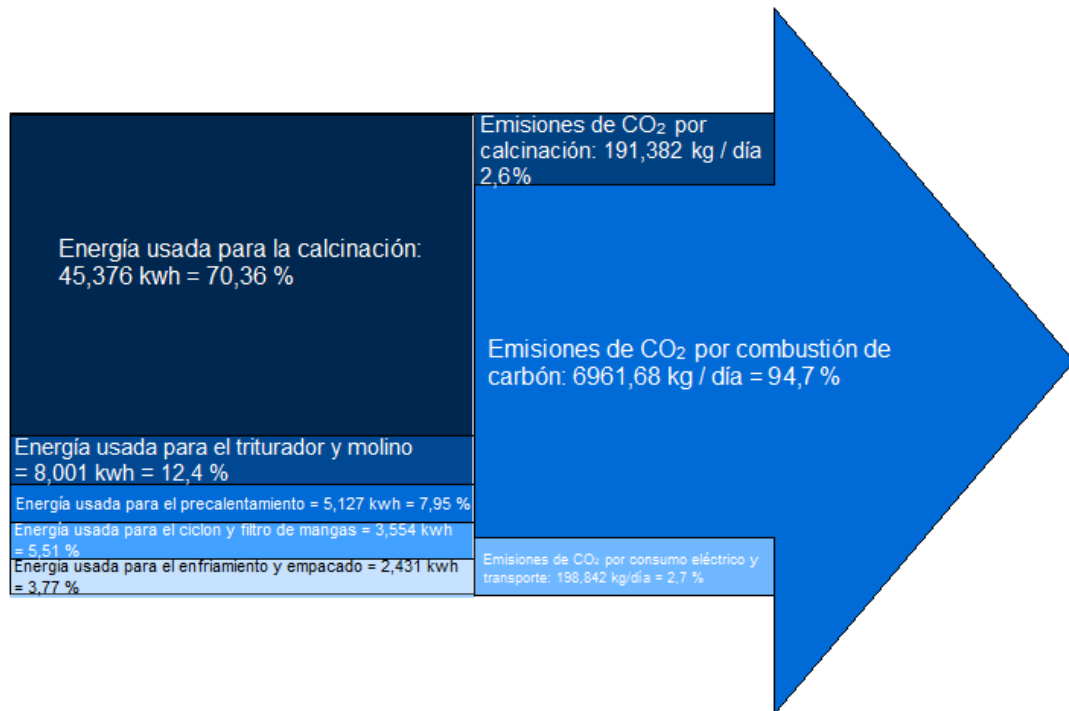
Grafico 4. Balance de materia de la planta de beneficio de minerales de yeso.



#### 4.10 BALANCE DE ENERGÍA DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO

Con los datos suministrados por la empresa y los cálculos realizados anteriormente, se realiza el balance de energía de la producción de yeso en la planta industrial como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Diagrama de Sankey para balance de energía en la planta de beneficio de minerales de yeso



Luego de realizado el respectivo balance de materia y energía del proceso de producción de yeso en la planta industrial, se puede apreciar que la etapa con mayor consumo de energía y emisiones producidas se da en la calcinación del yeso, en donde sucede la combustión del carbón. Es de suma importancia considerar las condiciones operativas de esta etapa del proceso para poder proponer un mejor rendimiento que baje el porcentaje de emisiones y consuma únicamente la energía necesaria para ser desarrollado.

## 5. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HIDRICA DE LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO

En la planta industrial de beneficio de minerales de yeso, por lo anteriormente mencionado, se aprecia que en sus procesos el consumo de agua es mínimo; de modo que, para realizar la estimación de la huella hídrica, se evalúan los consumos en oficinas y del personal operativo a cargo.

De este modo, y con base en los datos suministrados por la empresa se tienen los consumos mostrados en la Tabla 8..

Tabla 8. Valores detallados de la huella hídrica de la planta de beneficio de minerales de yeso

TIPO	CONSUMO
HUELLA HIDRICA AZUL (Agua potable de río consumida)	0,045 m <sup>3</sup> /kg de mineral
HUELLA HIDRICA VERDE (Agua de lluvia consumida)	0
HUELLA HIDRICA GRIS (Agua requerida para compensar el agua que se contamina)	0,037m <sup>3</sup> /kg de mineral

Usando la  $HH\ Actividad = HH\ Azul + HH\ Gris + HH\ Verde + HH\ Indirecta$  (3) se determinó la huella hídrica de la planta de beneficio de minerales de yeso.

$$HH\ Actividad = 0,045\ m^3/kg + 0,037\ m^3/kg = 0,082\ m^3/kg * 10000\ kg/día = 820\ m^3/día$$

Se realiza un análisis de las emisiones y vertientes de cada proceso, representado en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen de huella ecológica de la planta de beneficio de minerales de yeso.

Etapas de beneficio de yeso	Emisiones [kg]	Vertidos [m <sup>3</sup> ]
	CO <sub>2</sub>	
Trituración(Martillo)	-	-
Molino de bolas	-	-
Precaentador	-	-
Horno calcinador	191,382	
Combustión	6961,68	
Consumos energéticos y de transporte	198,842	-
Agua portable	-	450
Agua de dilución	-	370
TOTAL	7351,904	820

Del estudio realizado a la planta de beneficio de minerales de yeso se puede concluir que sus emisiones y vertidos se encuentran dentro de los límites permitidos por las entidades ambientales de control, aun así, se deberían realizar estudios posteriores para disminuir aún más la contaminación generada y aportar al arduo trabajo que se realiza a nivel mundial por mantener en las mejores condiciones habitables nuestro planeta.

## 6. CONCLUSIONES

Se realizó la estimación de la huella ecológica de la planta de beneficio de minerales de yeso y se encontró que sus emisiones y vertientes están dentro de los niveles permitidos en Colombia.

Se caracterizó el carbón empleado en la combustión en el proceso de calcinación del yeso de la planta industrial para medir las emisiones de CO<sub>2</sub> de éste proceso.

La huella de carbono de la planta de beneficio de minerales de yeso fue de 1270,533 ton de CO<sub>2</sub>/ año, valor que representa el 1,57% de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en Colombia anualmente; éste dato se encuentra dentro de lo permitido por las entidades de control ambiental, pero debe revisarse a fondo como disminuir aún más esta contaminación.

Dados los procesos energéticos realizados en la planta industrial se apreció que para ellos el agua no es un factor determinante y por ende los consumos de la misma son bastante bajos.

La huella hídrica para la planta de beneficio de minerales de yeso es de 820 m<sup>3</sup>/día, éste valor es muy bajo en el sector industrial comparado con estudios similares, dado que solo se evidencia por consumos internos no inherentes al proceso final de la planta.

## **7. RECOMENDACIONES**

En el horno se da la calcinación del yeso y en éste proceso fue donde se apreció una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> liberado al medio ambiente. Es necesario realizar un estudio a fondo de esta etapa, analizar cada una de las variables y de ser necesario realizar un sobre diseño de las condiciones operativas del mismo, para encontrar el rendimiento óptimo con las menores emisiones liberadas.

## BIBLIOGRAFIA

Acevedo Rincon , Luz Helena . «Caracterización de la huella de carbono de la operación del campo escuela colorado.» Bucaramanga , 2016.

Agencia Nacional de Minería . <https://www.anm.gov.co>. 19 de Enero de 2017.  
[https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets\\_santander\\_23-01-2017.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_santander_23-01-2017.pdf). (último acceso: 2 de Septiembre de 2017).

American Society For Testing and Materials . «Standard Classification of Coals by Rank .» 2015.

Ariza Santamaria , Carlos Augusto , y Catalina Gualdron Ordoñez . «Estimacion de la huella de carbono Hc mediante inventario de emisiones en la empresa "Ladrillera Versailles" .» Bucaramanga, 2016.

Campuzano Ochoa , CLaudia Patricia , y Juan Esteban Gonzalez Valencia . «Evaluación Multisectorial De La Huella Hídrica En Colombia.» Medellín , 2014.

Chacon Vargas , Jairo Raul. «Historia ampliada y comentada del análisis del ciclo de vida (ACV) con una bibliografía selecta.» 2008.

Comision Permanente del Pacifico Sur. «Línea Base del Conocimiento Regional sobre las Implicancias de la Huella de Carbono en los Procesos de Toma de Decisiones.» Vol. 2. 2014.

Echeverrua Belmonte , Elia Ruth . «Elaboración y evaluación de la resistencia mecánica de un material a base de Yeso y Zeolita.» Mexico , 2011.

Empresa Conservacion y Carbono S.A.S "Conservacion y Corbono S.A.S .  
«<http://www.conservacionycarbono.com>.» 5 de Mayo de 2017.  
<http://www.conservacionycarbono.com/analisis-del-ciclo-de-vida-iso14040>. (último  
acceso: 1 de Octubre de 2017).

Jimenez Herrero , Luis M , Jose Luis De la Cruz Leiva , y Monica Chao Janeiro .  
«<http://www.mapama.gob.es>.» 2 de Mayo de 2017.  
[http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual\\_comercio  
s\\_final\\_tcm7-230140.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual_comercios_final_tcm7-230140.pdf). (último acceso: 20 de Octubre de 2017).

Materials, American Society For Testing And. «Standard Test Method for Cone  
Penetration of Lubricating Grease.» 2016.

—. «Standard Test Method Total Moisture in Coal.» 2007.

Otero Villarino , Alberto . <http://ocw.usal.es>. 2 de Mayo de 2017.  
[http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-  
materiales/contenido/TEMA%203%20-%20EL%20YESO.pdf](http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%203%20-%20EL%20YESO.pdf). (último acceso: 2 de  
Septiembre de 2017).

Pardave , Walter . «Programa de Control de emisiones para la Industria Yesera  
Convencional.» *Esaica* 1, nº 1 (2015): 66-69.

Sanabria Gamboa , Andres Felipe , y Robinson Velasquez . «Determinaciona de la  
huella de crbono de la empresa Ladrillera el Zipa, Paipa Boyaca .» Bucaramanga ,  
2013.

Water Footprint Network. «Manual para la evaluacion de la huella hidrica .» 2016.

# **ANEXOS**

## ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN UTILIZADO EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO

### Análisis Químico del carbón (*Carbon, Hydrogen and Nitrogen Analyzer, CHN*)

Se realiza análisis en equipo SUNDY, modelo SDCHN 435 y se obtienen los resultados presentados a continuación, bajo los siguientes parámetros:

Voltaje: 220 V / 50 Hz

Potencia Máx: 4,5 Kw

### Análisis CHN, equipo SUNDY

Muestra	Peso muestra (mg)	CARBÓN		HIDRÓGENO			NITRÓGENO	
		C%	C%	H%	H%	H %	N%	N%
1	101,2	76,21	76,21	4.94	4.94	4.94	1,52	1,52
2	100.4	76,03	76,03	4.92	4.92	4.92	1,53	1,53

Fuente: Universidad Industrial de Santander

### Humedad presente del carbón

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} \times 100$$

(9)

Muestra 1

P1 (Peso de crisol vacío con tapa en g)  
= 17,3872 g

P2 (Peso de crisol y 1g de muestra) =  
18,4039 g

P3 (Peso de crisol y carbón después  
del secado g) = 18,3934 g

$$\% \text{Humedad} = \frac{18,4039 - 18,3934}{18,4039 - 17,3872} \times 100 = 1,033 \%$$

Muestra 2

P1 (Peso de crisol vacío con tapa en g)  
= 18,8580 g

P2 (Peso de crisol y 1g de muestra) =  
19,8460 g

P3 (Peso de crisol y carbón después  
del secado g) = 19,8355 g

$$\% \text{Humedad} = \frac{19,8460 - 19,8355}{19,8460 - 18,8580} \times 100 = 1,063 \%$$

**Cenizas presentes en el carbón.**

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{P_3 - P_1}{P_2 - P_1} \times 100$$

(10)

Muestra 1

P1 (Peso de crisol vacío con tapa en  
g) = 18,5254

P2 (Peso de crisol y 1g de muestra) =  
19,5248

P3 (Peso de crisol y carbón después  
del secado g) = 18,6228

$$\% \text{Ceniza} = \frac{18,6228 - 18,5254}{19,5248 - 18,5254} \times 100 = 9,75 \%$$

Muestra 2

P1 (Peso de crisol vacío con tapa en  
g) = 15,9156 g

P2 (Peso de crisol y 1g de muestra) =  
16,9106 g

P3 (Peso de crisol y carbón después  
del secado g) = 16,0133 g

$$\% \text{Ceniza} = \frac{16,0133 - 15,9156}{16,9106 - 15,9156} \times 100 = 9,82 \%$$

**Materia volátil presente en el carbón.**

$$\% \text{ Pérdida de peso} = \frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_1} \times 100 \quad (11)$$

$$\% \text{ Materia volátil} = \% \text{ Pérdida de peso} - \% \text{ Humedad} \quad (12)$$

**Muestra 1**

P1 (Peso de crisol vacío con tapa en g)  
= 14,4398 g

P2 (Peso de crisol y 1g de muestra) =  
15,4530 g

P3 (Peso de crisol y carbón después  
del secado g) = 15,0746 g

$$\% \text{ Pérdida de peso} = \frac{15,4530 - 15,0746}{15,4530 - 14,4398} \times$$

$$100 = 37,347 \text{ g}$$

$$\% \text{ Materia volátil} = 37,347 - 1,033 =$$
$$36,154 \%$$

**Muestra 2**

P1 (Peso de crisol vacío con tapa en g)  
= 18,3235 g

P2 (Peso de crisol y 1g de muestra) =  
19,3249 g

P3 (Peso de crisol y carbón después  
del secado g) = 18,9426 g

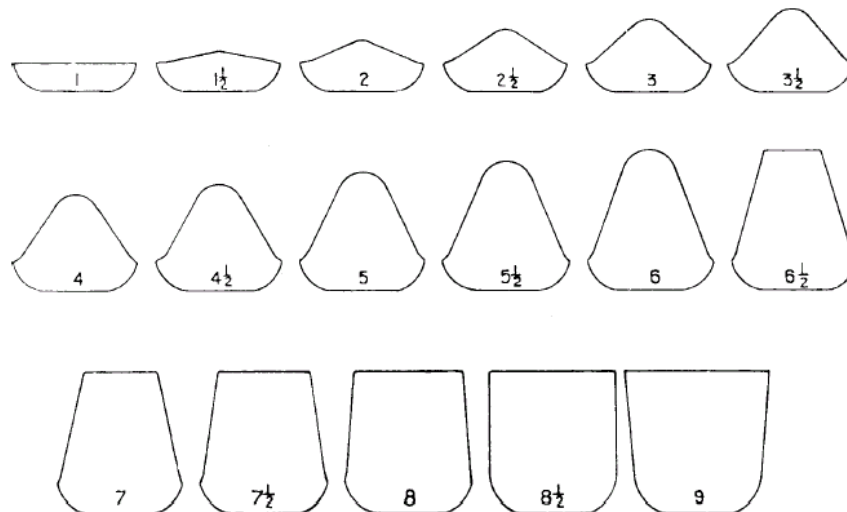
$$\% \text{ Pérdida de peso} = \frac{19,3249 - 18,9426}{19,3249 - 18,3235} \times$$

$$100 = 38,176 \text{ g}$$

$$\% \text{ Materia volátil} = 38,176 - 1,063 =$$
$$37,113 \%$$

## Determinación del índice de hinchamiento

### Valores de índice de hinchamiento



Se obtuvieron dos botones los cuales fueron comparados figura anterior Para determinar los valores de índice de hinchamiento según la norma ASTM D 720

**Muestras de carbón obtenidos de la prueba de índice de hinchamiento; a) muestra 1: 1,08 g, b) muestra 2: 1,01 g.**



Se comparan los resultados observados en la figura anterior con los teóricos de la figura anterior y se determina que el índice de hinchamiento para este carbón es de 2 a 2,5.

### Determinación del poder calorífico

$$\text{Poder calorífico} = \frac{\Delta T^\circ * \text{Constante Calorimetría}}{\text{Peso de la muestra}}$$

(13)

$$T_i = 23,92 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_f = 26,51 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$K = 5088,366 \frac{\text{Btu} \cdot \text{L}}{\text{g} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\text{Poder calorífico} = \frac{2,59 * 5088,366}{0,9998} = 13181,504 \text{ Btu} \cdot \text{L}$$

$$\text{Poder calorífico} = 13181,504 * 0,556 = 7328,916 \text{ cal} \cdot \text{g}$$

### Cantidad de azufre total presente en el carbón.

$$\% \text{ Azufre} = \frac{(A-B) * 13,738}{M}$$

(14)

$$\% \text{ Azufre} = \frac{(0,0879 - 0,000624) * 13,738}{1,06457} = 1,1263\%$$

Peso de crisol = 18,5215 g

Crisol con un gramo de muestra = 19,58607 g

3,001 g de mezcla Eschka

Crisol para precipitado = 18,7632 g

Crisol con el precipitado = 18,8511 g

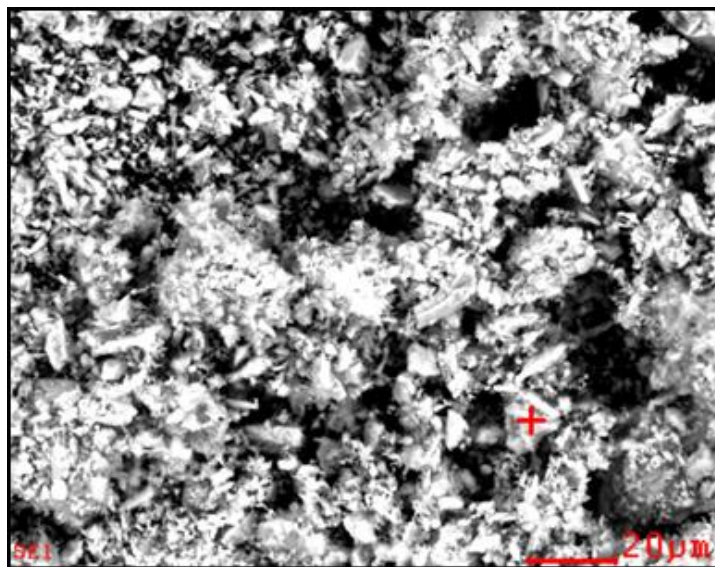
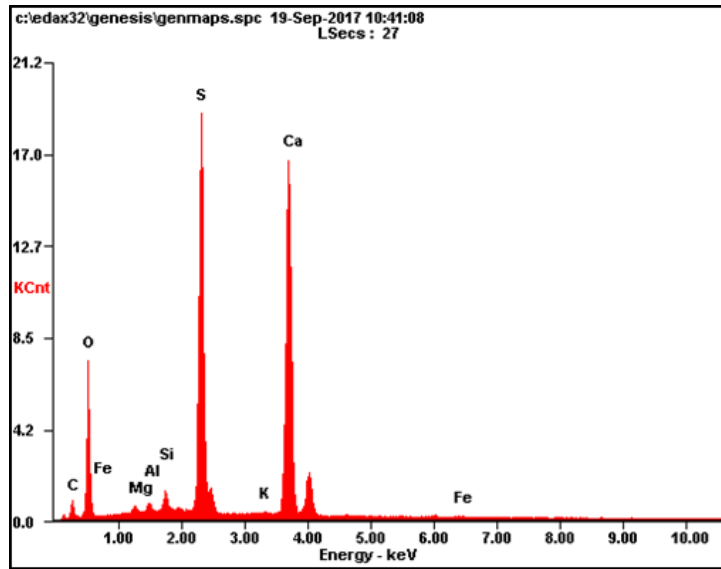
A= Peso precipitado de  $\text{BaSO}_4$  = 0,0879g

M = Peso de la muestra = 1,06457g

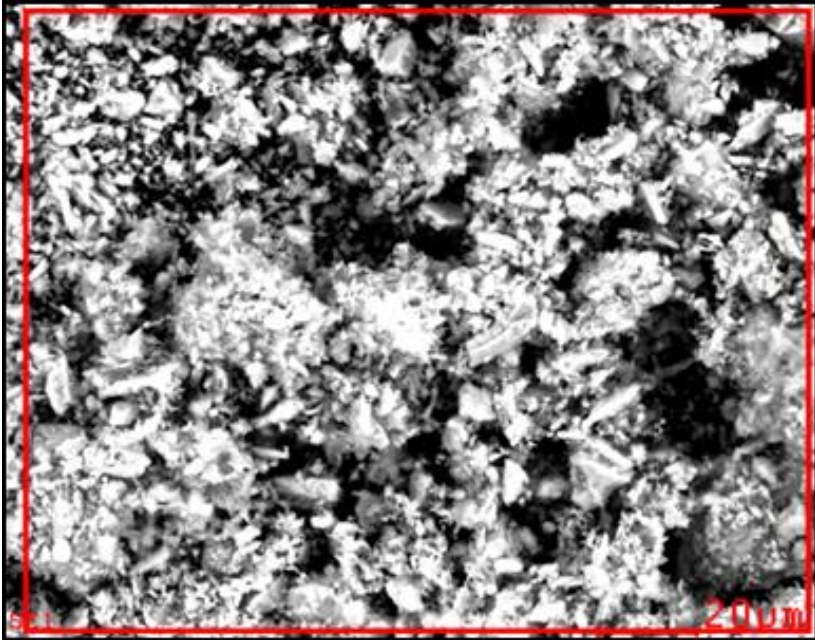
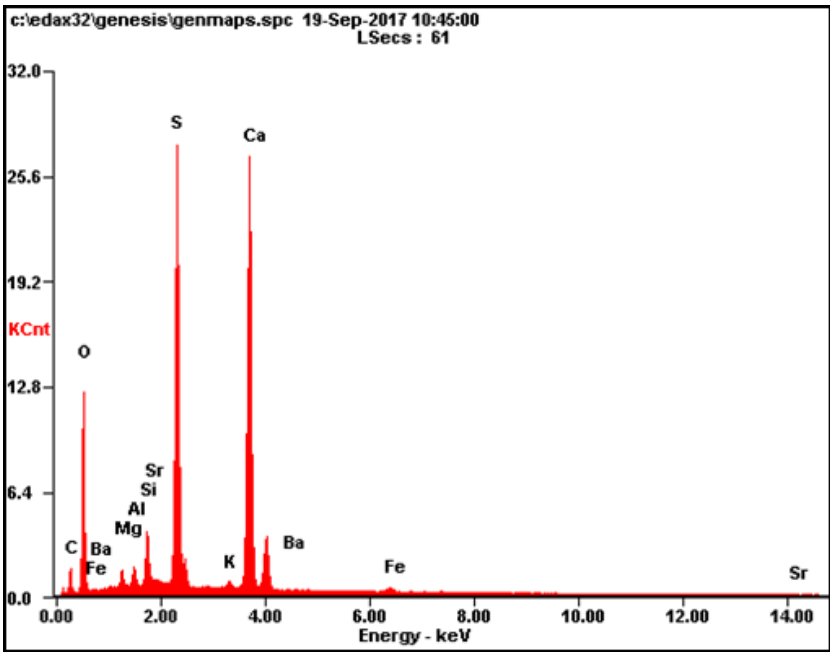
# ANALISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

## Mineral de Yeso

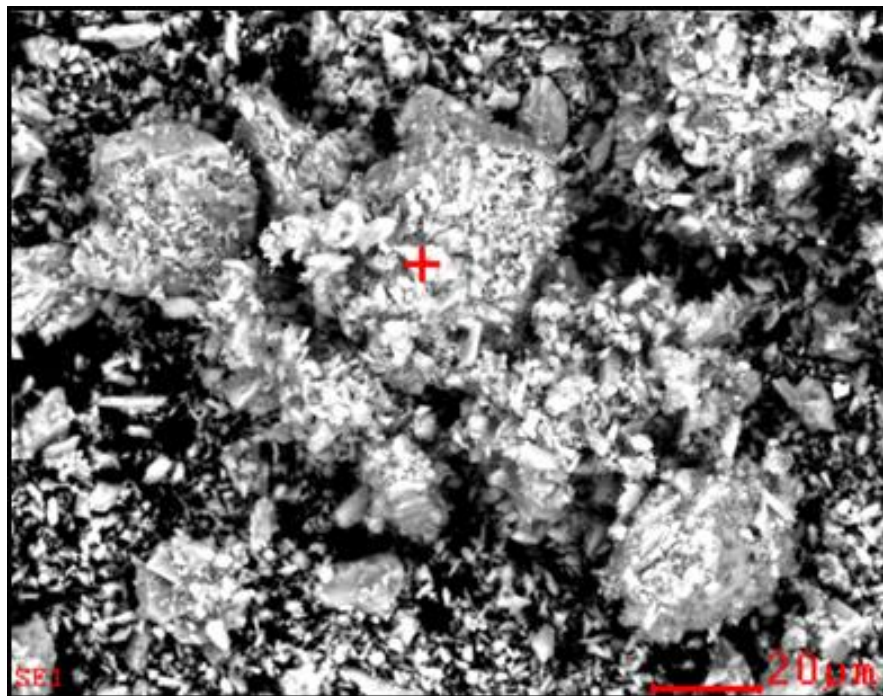
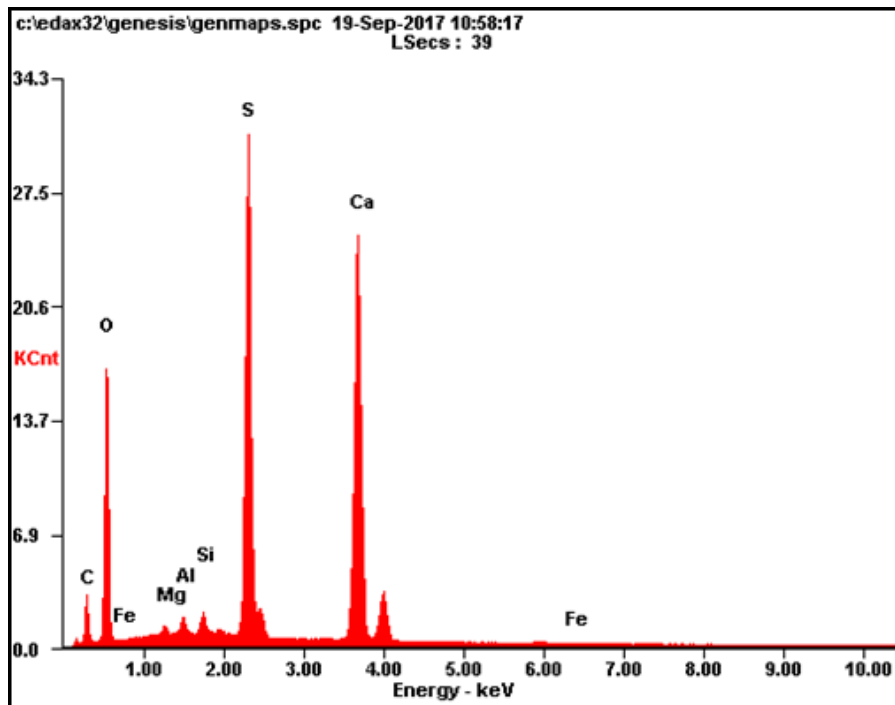
### Caracterización elemental por SEM, muestra 1, mineral de yeso



Caracterización elemental por SEM, muestra 2, mineral de yeso

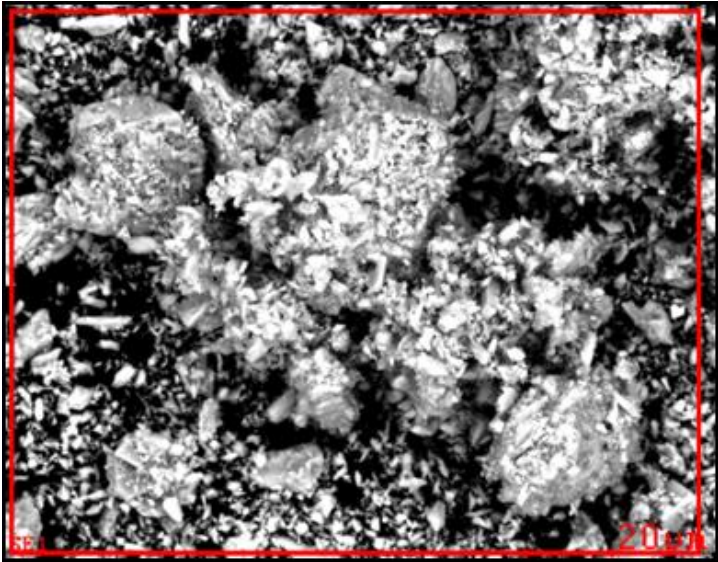
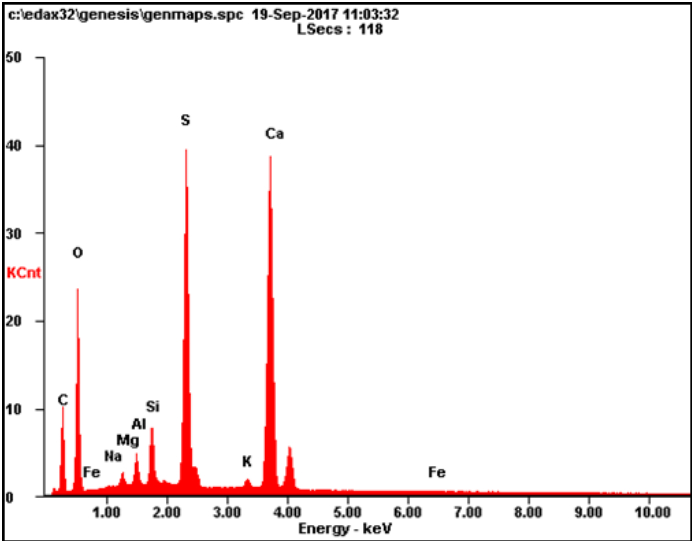


### Caracterización elemental por SEM, muestra 3, mineral de yeso

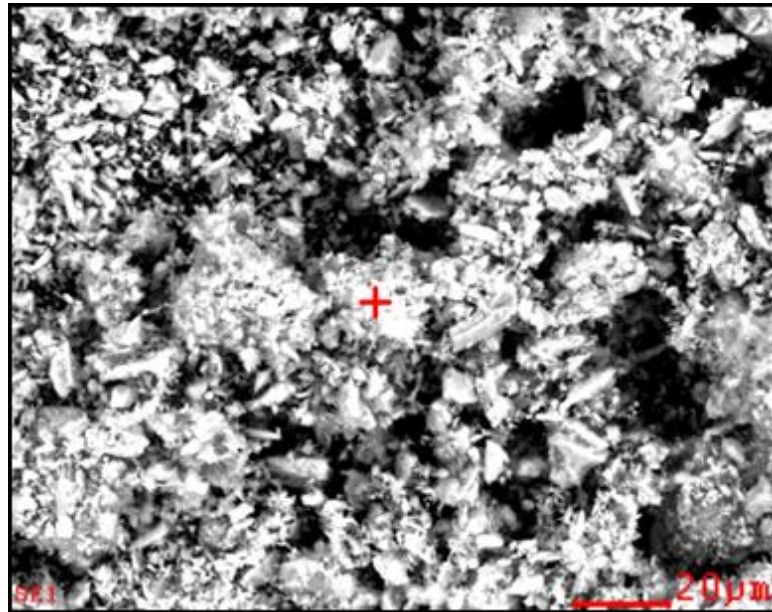
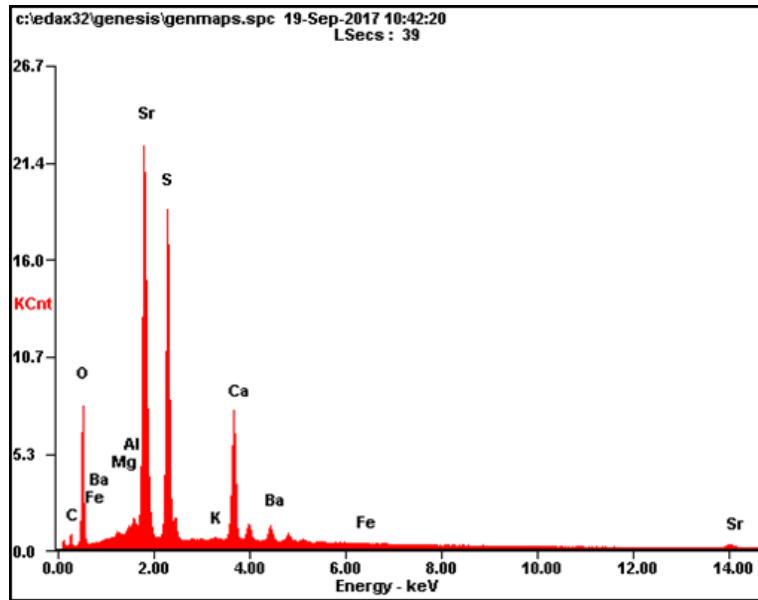


Yeso

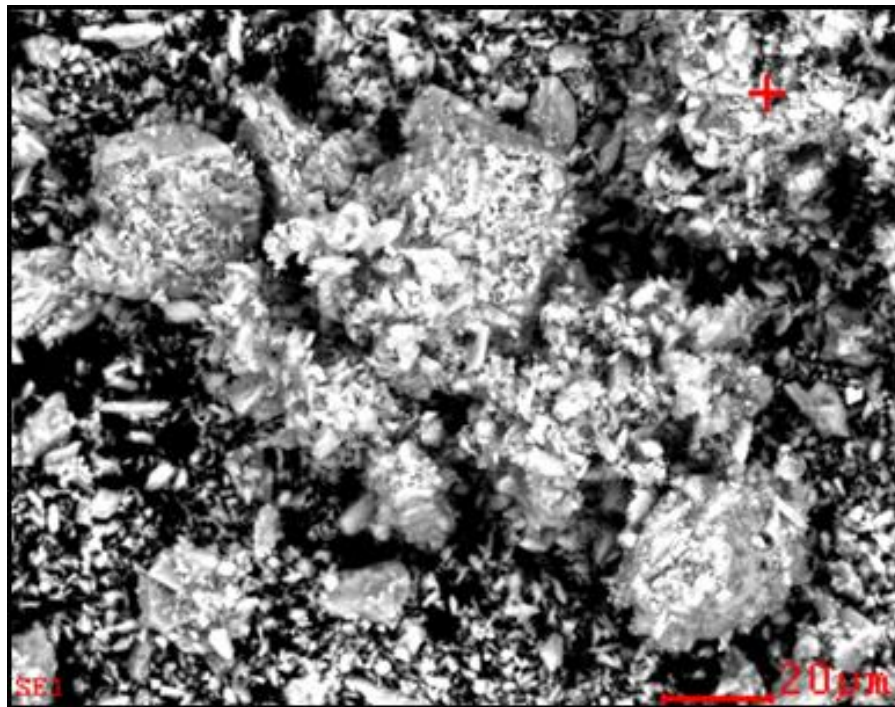
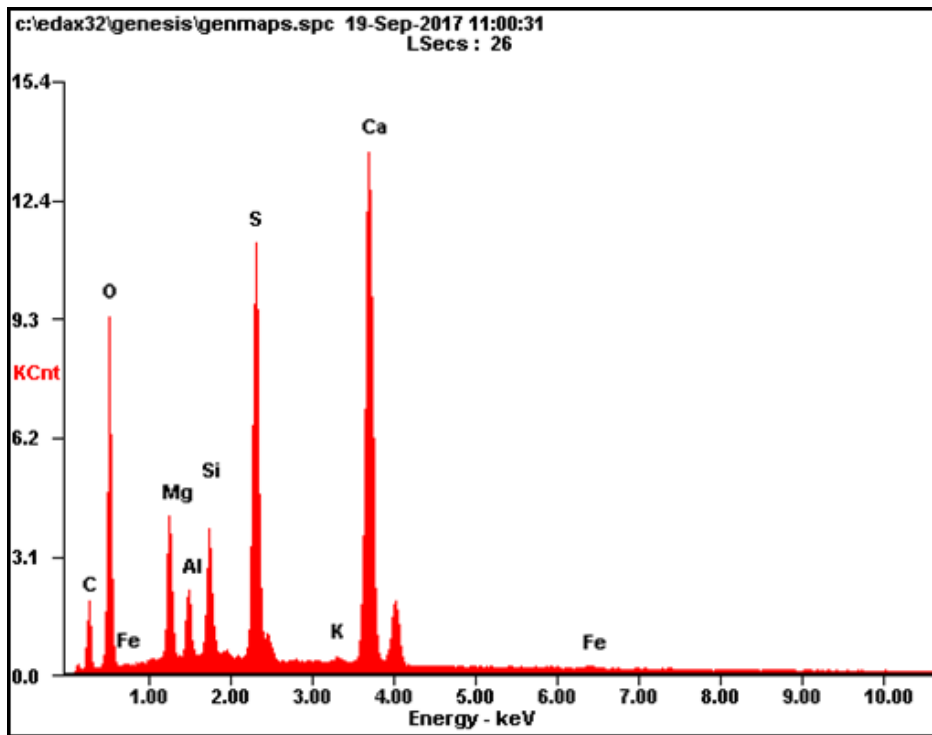
Caracterización elemental por SEM, muestra 1, yeso



## Caracterización elemental por SEM, muestra 2, yeso



### Caracterización elemental por SEM, muestra3, yeso



## FACTOR DE EMISIÓN PARA COMBUSTIBLES

### Los factores usados para los consumos energéticos

FACTOR	EMISIÓN [ Kg de CO <sub>2</sub> ]
Consumo energético	0,175737

### Los factores usados para los combustibles

COMBUSTIBLE	EMISIÓN [ Kg de CO <sub>2</sub> /Gal ]
Gasolina de Aviación	8,31
Bio Diesel	9,45
Etanol	5,75
Metanol	4,1
Enfriamiento	1,975
Diesel	10,21
Gasolina por motor	8,78
Propano	5,27