

Evaluación Térmica de un Horno Vertical Artesanal para la Calcinación de Piedra Caliza  
en el Municipio de Nobsa, Boyacá

Dhaly Danielle Granados Mejía

Víctor Javier Pedraza Moreno

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Mecánicos

Director

Diego Luis Franco Jácome

PhD. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1 Justificación .....	11
2 Descripción del Problema .....	15
3 Objetivos de la Investigación.....	17
3.1 Objetivo General.....	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
4 Marco Teórico.....	18
4.1 La Piedra Caliza.....	18
4.2 Cal (óxido de calcio CaO).....	19
4.3 Tipos de Horno .....	22
4.3.1 Hornos Verticales.....	22
4.3.2 Hornos Verticales de Corriente Paralela Regenerativos.....	24
4.3.3 Horno Rotativo.....	27
4.4 Producción de Cal.....	29
4.5 Descripción del Proceso.....	32
4.6 Calcinación .....	40
5 Metodología .....	41
5.1 Descripción de los Materiales.....	41
5.2 Pruebas de Laboratorio .....	43
5.2.1 Descripción de las Pruebas Realizadas.....	43

5.2.2	Prueba de Caracterización del combustible (PC): .....	44
5.2.3	Análisis por FRX de las Cenizas: .....	45
5.2.4	Análisis por FRX Piedra Caliza:.....	46
5.2.5	Análisis por FRX de la Cal: .....	46
5.3	Condiciones operacionales del horno de calcinación. ....	47
5.3.1	Balance de Masa .....	50
5.3.2	Balance de Energía .....	56
5.3.3	Balance de Exergía .....	59
5.3.4	Eficiencia Energética y Exergética: .....	64
6	Resultados y Análisis de Resultados.....	66
6.1	Resultados y Análisis de las Pruebas de Laboratorio .....	66
6.1.1	Análisis de la Prueba de Caracterización (PC): .....	66
6.1.2	Análisis por FRX Cenizas:.....	68
6.1.3	Análisis por FRX Piedra Caliza:.....	69
6.1.4	Análisis por FRX de la Cal: .....	70
6.2	Balance de Masa .....	71
6.3	Balance de Energía .....	72
6.4	Eficiencia energética.....	75
6.5	Balance de Exergía .....	76
6.6	Eficiencia Exergética .....	78
6.7	Análisis económico.....	79
6.7.1	Costo de producción de la cal en el horno artesanal de 25 toneladas .....	79
6.7.2	Costo real de la energía útil aprovechada .....	81
7	Conclusiones .....	82
	Referencias Bibliográficas .....	84

### Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de un Horno Vertical .....	22
<b>Figura 2.</b> Horno Artesanal en Sudán.....	23
<b>Figura 3.</b> Horno Vertical en Zimbabue.....	24
<b>Figura 4.</b> Horno Regenerativo Marca Maerz en Caleras San Juan, Argentina.....	26
<b>Figura 5.</b> Partes de un horno de doble eje regenerativo.....	26
<b>Figura 6.</b> Partes Principales de un Horno Rotatorio para Cal.....	27
<b>Figura 7.</b> Horno Rotatorio en Irán .....	28
<b>Figura 8.</b> Tipos de Hornos Rotatorios.....	29
<b>Figura 9.</b> Producción de Piedra Caliza en Colombia.....	31
<b>Figura 10.</b> Horno Artesanal Nobsa, Boyacá .....	32
<b>Figura 11.</b> Extracción de piedra de la cantera.....	33
<b>Figura 12.</b> Piedra cargada en volquetas. ....	33
<b>Figura 13.</b> Transporte del mineral hacia los hornos.....	34
<b>Figura 14.</b> Piedra caliza descargada.....	34
<b>Figura 15.</b> Proceso de trituración de la piedra. ....	35
<b>Figura 16.</b> Preparación del combustible .....	35
<b>Figura 17.</b> Llenado del horno.....	36
<b>Figura 18.</b> Llenado de la piedra caliza. ....	36
<b>Figura 19.</b> Llenado del horno en capas .....	37

<b>Figura 20.</b> Llenado del horno hasta 10 capas.....	37
<b>Figura 21.</b> Sellado del horno con arcilla.....	38
<b>Figura 22.</b> Ignición de la capa inferior del horno. ....	38
<b>Figura 23.</b> Calcinación de la piedra caliza.....	39
<b>Figura 24.</b> Extracción de la cal. ....	39
<b>Figura 25.</b> Diferentes zonas del horno.....	40
<b>Figura 26.</b> Muestra de piedra caliza.....	41
<b>Figura 27.</b> Muestra de Cal.....	42
<b>Figura 28.</b> Mezcla de combustible compuesta de coque y carbón en una relación 10:1. ....	43
<b>Figura 29.</b> Volumen de control.....	49
<b>Figura 30.</b> Diagrama Sankey del balance de energía.....	73
<b>Figura 31.</b> Diagrama de Exergía en un Sistema Termodinámico.....	77

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> Aplicaciones de la Cal en la Industria.....	19
<b>Tabla 2.</b> Principales Tipos de Hornos para Cal.....	21
<b>Tabla 3.</b> Principales Productores Mundiales de Cal .....	30
<b>Tabla 4.</b> Conversión porcentaje a masa. ....	52
<b>Tabla 5.</b> Composición del combustible.....	54
<b>Tabla 6.</b> Análisis de gases planteado por Alcántara.....	55
<b>Tabla 7.</b> Resultados Obtenidos Prueba de Caracterización (PC):.....	66
<b>Tabla 8.</b> Resultados Obtenidos FRX Cenizas .....	68
<b>Tabla 9.</b> Resultados Obtenidos FRX Piedra Caliza .....	69
<b>Tabla 10.</b> Resultados Obtenidos FRX de la Cal.....	70
<b>Tabla 11.</b> Comparación de eficiencias con la literatura. ....	76
<b>Tabla 12.</b> Comparación Eficiencia Exergética.....	79
<b>Tabla 13.</b> Gastos Producción de 25 Toneladas .....	80

### **Lista de Apéndices**

**Apéndice A:** Cálculos detallados del modelo termodinámicos.

**Apéndice B:** Prueba de caracterización del combustible.

**Apéndice C:** Análisis FRX a la piedra caliza.

**Apéndice D:** Análisis FRX a la cal.

**Apéndice E:** Análisis FRX a las cenizas.

## Resumen

**Título:** Evaluación Térmica de un Horno Vertical Artesanal para la Calcinación de Piedra Caliza en el Municipio de Nobsa, Boyacá.\*

**Autores:** Dhaly Danielle Granados Mejía, Víctor Javier Pedraza Moreno\*\*

**Palabras Clave:** producción de cal, análisis energético, análisis exergético, eficiencia térmica, transición energética, biomasa, Nobsa, Boyacá.

**Descripción:** La cal es un insumo esencial para múltiples sectores industriales, desde la siderurgia hasta la construcción, y su producción sigue teniendo una alta demanda en el contexto colombiano. En el municipio de Nobsa (Boyacá), la producción de cal aún se realiza en hornos verticales artesanales, los cuales, pese a su bajo costo de instalación y operación, presentan niveles críticos de ineficiencia térmica y alto impacto ambiental debido a su dependencia de combustibles fósiles y a la ausencia de sistemas de control de particulados.

Este trabajo presenta un análisis térmico integral de un horno vertical de eje central con capacidad de 25 toneladas, característico del parque calero de la región. La metodología incluyó la recopilación de datos operacionales reales, la caracterización fisicoquímica de las materias primas, y la modelación del proceso de calcinación para estimar la eficiencia energética, las pérdidas exergéticas y los costos asociados a la producción bajo el escenario actual.

Los resultados permiten identificar los principales focos de pérdida energética y económica del sistema, y constituyen una línea base fundamental para la formulación de propuestas de modernización tecnológica. En conclusión, el estudio abre la posibilidad de transformar la industria calera local hacia un modelo más sostenible, con menor huella de carbono y mayor eficiencia, sin comprometer su competitividad ni su aporte al desarrollo económico regional.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Diego Luis Franco Jácome. PhD. Ingeniería Mecánica.

### Abstract

**Title:** Thermal Evaluation of a Vertical Kiln for Limestone Calcination in the Municipality of Nobsa, Boyacá.\*

**Author:** Dhaly Danielle Granados Mejía, Víctor Javier Pedraza Moreno\*\*

**Key Words:** lime production, energy analysis, exergy analysis, thermal efficiency, energy transition, biomass, Nobsa, Boyacá.

**Description:** Lime is a key input for various industrial sectors, including metallurgy, construction, and environmental management. In Colombia, particularly in the municipality of Nobsa (Boyacá), lime production is still carried out using traditional vertical shaft kilns, which, although economically accessible, suffer from critical thermal inefficiencies and significant environmental impacts due to their reliance on fossil fuel and the absence of particle control systems.

This study presents a comprehensive thermal analysis of a 25-ton capacity artisanal vertical kiln, representative of those commonly used in the region. The research methodology included the collection of operational data under real conditions, physicochemical characterization of raw materials, and process modeling to estimate energy efficiency, exergy losses, and associated production costs.

The results highlight the major sources of energy and exergy losses within the system and establish a solid baseline for future comparative studies. This analysis contributes to the development of a roadmap toward the technological modernization of the local lime industry, promoting a more sustainable production model with lower carbon emissions and improved energy performance, aligned with Colombia's climate commitments and regional development goals.

---

\* Degree Work.

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Diego Luis Franco Jácome. PhD. Mechanical Engineering.

## Introducción

La industria calera del municipio de Nobsa, ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia, ha desempeñado históricamente un papel clave en el desarrollo económico regional, gracias a la abundancia de yacimientos de piedra caliza y a su ubicación estratégica en el altiplano cundiboyacense. Sin embargo, a pesar de su importancia productiva, gran parte de esta industria continúa operando con tecnologías rudimentarias, siendo los hornos verticales de eje central una de las estructuras predominantes para la producción de cal viva.

Estos hornos artesanales, aunque funcionales, presentan importantes deficiencias en cuanto a eficiencia energética, control térmico y emisiones contaminantes. La operación empírica, la falta de aislamiento térmico y el uso intensivo de combustibles fósiles, como el carbón mineral, derivan en pérdidas energéticas significativas y altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), uno de los principales responsables del cambio climático.

En este contexto, y en línea con los compromisos internacionales adquiridos por Colombia mediante la actualización de su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC), que plantea una reducción del 51% de emisiones GEI al año 2030 y la meta de carbono neutralidad para 2050, se hace imprescindible transformar los procesos industriales intensivos en energía. Este estudio tiene como objetivo realizar un análisis térmico y económico de un horno vertical artesanal de 25 toneladas de capacidad, actualmente en funcionamiento en Nobsa, con el fin de cuantificar su desempeño energético, determinar los principales puntos de pérdida y explorar alternativas sostenibles de mejora, como el uso de biomásas renovables como fuente de energía.

## 1 JUSTIFICACIÓN

La producción de cal en el municipio de Nobsa es un proceso artesanal que no ha presentado renovaciones tecnológicas significativas que ayuden a mejorar su eficiencia y reducir sus emisiones de GEI. En esta región, aún se utilizan hornos fabricados de ladrillos y piedras, contruidos en laderas, que son operados de forma empírica y sin un control riguroso de variables del proceso y de sus emisiones (DANE, 2024).

Según la European Lime Association EULA en la actualidad existen 3 tipos de hornos (verticales, rotativos y verticales de doble cuba) con un mayor nivel de tecnificación usados para la calcinación de la piedra caliza, los cuales son seleccionados según las características de la piedra usada y de la calidad de la cal viva requerida. Los hornos verticales son operados con gas natural, combustibles sólidos y/o líquidos, para la quema de piedras de 20 mm a 175 mm de diámetro, produciendo cal viva de reactividad media (Tovar, Sanguino, & Baztan, 2014).

De acuerdo con la EULA los hornos rotativos son operados con carbón mineral, coque de petróleo, gas natural o combustibles derivados de residuos, y son alimentados de piedra caliza o dolomita, para producir cal viva de alta pureza o cal dolomítica, respectivamente. Los tamaños de piedra comúnmente utilizados pueden variar entre 15 a 30 milímetros de diámetro. Finalmente, los hornos verticales de doble cuba de flujo regenerativo alcanzan los mayores niveles de eficiencia y son operados con gas natural para la quema de piedras de 90 a 125 mm de diámetro, produciendo cal viva de alta pureza (Tovar, Sanguino, & Baztan, 2014).

En Colombia, ya existen empresas que han apostado por implementar hornos de alta tecnología para mejorar las condiciones de sus procesos y la calidad de sus productos terminados. Tal es el caso de Caltek, un emprendimiento nacido de una alianza entre Cementos

Argos y el Grupo Calidra, de México (Muñoz & Mondoñeda, 2020). Según el sitio web oficial de la empresa Argos cuentan con un horno Maerz (de doble cuba con flujo regenerativo) de última tecnología que alcanza un nivel de producción de 90.000 toneladas de cal por año (Ballesteros, 2014).

Por otro lado, en el mundo existen varios ejemplos de empresas que utilizan carbón vegetal de origen forestal (eucalipto) como combustible para sus procesos de generación de energía. De acuerdo con Fernández son plantaciones de rápido crecimiento y que poseen una rápida adaptabilidad a diversas condiciones climáticas, su uso como combustibles no resulta en efectos medioambientales negativos como la deforestación con fines energéticos (Fernandez, 2018).

La implementación de este tipo de biomásas contribuye a una industria con menores emisiones de GEI de origen fósil y, por lo tanto, una reducción de la huella de carbono. Tal es el caso de la empresa brasileña Gerdau que cuenta con más de 250.000 hectáreas de bosques de eucalipto disponibles para su transformación en carbón vegetal que es usado en la producción de acero (Ballesteros, 2014).

Otro ejemplo del uso de combustibles de origen forestal es la empresa CYCUSA ubicada en Uruguay, la cual se dedica a la extracción, fabricación y venta de cal desde 1936. Esta empresa, de carácter familiar, en sus inicios contaba con dos pequeños hornos que se alimentaban con carbón de coque, el cual empezó a escasear durante la Segunda Guerra Mundial. CYCUSA, decidió comenzar a usar leña como combustible, para lo cual empezó a forestar en los alrededores de las minas y desde entonces ha usado la leña como combustible para la producción de cal, este empresa produce cerca de 25 toneladas de cal por día, con un consumo de

aproximadamente 1 tonelada de leña por cada tonelada de cal producida (Jimenez, Lopez, & Montaña, 2011).

De la misma manera, en Morón de la Frontera, provincia de Sevilla en España, se encuentra la empresa Gordillos Cal de Morón, la cual es una empresa familiar con siglos de tradición que opera desde 1874. De acuerdo con Troya esta compañía emplea procesos totalmente artesanales que han perdurado desde sus inicios y son usados hasta el día de hoy; y su producción oscila entre 140 y 150 toneladas de cal por cada 100 toneladas de leña. Según Rossel (2013), usan hornos de origen árabe alimentados con combustible vegetal principalmente de olivo, pero también de pino y eucalipto (Troya, 2017)

De acuerdo con Fajardy & Pour, las biomásas residuales y forestales son combustibles renovables puesto que sus ciclos de crecimiento ocurren en periodos de tiempo cortos (1 a 10 años dependiendo del tipo de biomasa), al ser comparados con los ciclos de formación geológica de los combustibles fósiles. Además, la combustión de la biomasa se considera neutra en emisiones de CO<sub>2</sub>, puesto que el CO<sub>2</sub> emitido durante la combustión es capturado posteriormente durante su crecimiento mediante el proceso de fotosíntesis. Este sistema de producción circular propicia la captura de CO<sub>2</sub> de la atmósfera y permite una transformación hacia el uso de energías “neutras” o de cero emisiones netas (Fajardy & Pour, 2012).

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible fue lanzada la Estrategia Colombia Carbono Neutral (ECCN) con el objetivo de incentivar al sector industrial, al Estado y a la ciudadanía, en la búsqueda de herramientas y procesos que permitan el cumplimiento de los compromisos del país en la NDC. La ECCN se divide en tres bloques trabajo: Programa Carbono Neutralidad, dirigido a las organizaciones públicas y privadas; SINA

Carbono Neutral, dirigido a entidades del Sistema Nacional Ambiental; y Mi Huella Carbono, dirigido a la sociedad civil (Tovar, Sanguino, & Baztan, 2014).

El Programa Carbono Neutralidad es una iniciativa que convoca a las organizaciones a que, de manera voluntaria, se inicien en la gestión de GEI a través del fortalecimiento de capacidades y conocimientos en el tema. Para esto, clasifica las organizaciones en cuatro grupos según su nivel de avance en la gestión de GEI: Grupo 1 - Cálculo Huella Carbono; Grupo 2- Gestión GEI; Grupo 3- Carbono Neutro; Grupo 4 – Alineación NDC.

El Grupo 1 tiene como alcance el reconocimiento de las fuentes de emisión, la cuantificación de estas y la elaboración del inventario de GEI. La identificación y cuantificación de emisiones sería un punto de partida para la industria artesanal de cal pues representaría el caso base, a partir del cual se pueden realizar comparaciones con diferentes combustibles y tecnologías de producción.

Debido a lo anterior, se identifica una oportunidad de desarrollo de este sector, para lo cual es preciso realizar un estudio que incluya la recopilación de datos técnicos y energéticos de la producción de cal de un horno vertical artesanal usado en el municipio de Nobsa, Boyacá, con los que se pueda establecer un escenario base mediante un análisis energético y exergético de las etapas del proceso.

Este trabajo contribuiría con la transición energética de la industria calera siendo un primer paso para seguir en el camino hacia la transición tecnológica que debe tener lugar en esta industria.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con el DANE, la fabricación de cemento, cal y yeso pertenece a la sección de Industrias Manufactureras dentro de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU). En el año 2021, esta sección representó el 11.7% (\$COP 3,663 millones) del PIB del departamento de Boyacá. El municipio de Nobsa, cuya actividad económica principal es la transformación de la piedra caliza, según el DANE es el responsable de aproximadamente 37% del PIB del Sector Manufactura (\$COP 1,351 millones), y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo cataloga a la producción de cal como una de las actividades más relevantes en la región (DANE, 2020).

En la actualidad, se estima que en la zona hay 190 hornos operando para una producción mensual de aproximadamente 1200 toneladas de cal. De acuerdo con Sánchez emplea cerca de 1300 personas a lo largo de la cadena (suministro, transporte, procesamiento y comercialización) esta cal es usada como insumo en las industrias cementera y metalúrgica, en el sector agrícola, en la fabricación de vidrio y de papel, entre otros (Sanchez, 2019).

La producción de cal en esta región tiene como característica principal el uso de hornos artesanales de eje vertical, cuya tecnología es considerada obsoleta debido a los altos niveles de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y particulados. Estos, según Alcántara, alcanzan valores hasta de 1.4 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de cal producida. Estas emisiones son consecuencia de un bajo control de las variables del proceso (cantidad de aire suministrado, temperatura de combustión, tipo de combustible, etc.) y de la ausencia de sistemas de control de emisiones (Alcantara, 2009)

Adicionalmente, de acuerdo con la Resolución 0802 de 1999 de CORPOBOYACA, el combustible que debe ser usado en los hornos de cocción de la caliza es una mezcla de 3%

carbón mineral y 97% coque. No obstante, según la Alcaldía Municipal de Nobsa, los altos precios del coque en Colombia han generado un elevado incremento en los costos que no se refleja en el precio por tonelada del producto final. Esta situación ha llevado a replantear si existe una mejor alternativa de combustible que viabilice la producción de cal (Higuera & Lopez, 2011).

La baja tecnificación combinada con los combustibles usados actualmente se traduce en unos impactos ambientales y sociales que demandan una transición energética en esta industria orientada a la reducción de sus emisiones. Dicha transición aportaría al cumplimiento de uno de los compromisos asumidos por Colombia en la Contribución Determinada Nacional (Nationally Determined Contribution NDC) presentada en la Conferencia de las Partes en el año 2020, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que busca reducir las emisiones totales de GEI del país en un 51% en el año 2030 y alcanzar la carbono neutralidad en 2050 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Dado que en la región boyacense la producción de cal es artesanal, para lograr su transición hacia un modelo más sostenible es necesario identificar su estado actual o escenario base. Esto con el fin de establecer un punto de partida que permita identificar los factores influyentes en el proceso y que, a partir de la definición de este escenario, se abra el camino para que, en un futuro, se puedan plantear nuevos casos que incluyan diferentes tecnologías e insumos energéticos hacia la mejora de la eficiencia y reducción de las emisiones del proceso. Por tanto, es necesario determinar mediante un análisis térmico: ¿cuál es el estado actual de un horno vertical artesanal utilizado para a producción de cal en el municipio de Nobsa (Boyacá)?

### **3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Objetivo General**

Realizar un análisis termoeconómico de un horno de eje vertical con capacidad de 25 toneladas para la producción de cal en el municipio de Nobsa, Boyacá.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar la toma de datos característicos del horno (dimensiones del horno, temperaturas de trabajo, flujos de material, productividad).
2. Caracterizar, mediante un análisis de composición elemental, las materias primas utilizadas en el proceso (combustible y calcáreo) y el producto resultante (cal).
3. Desarrollar un análisis energético del proceso de calcinación de la piedra caliza con el fin de caracterizar el escenario actual del horno e identificar los factores influyentes en este proceso.
4. Determinar las pérdidas de eficiencia en la calcinación de la piedra caliza, mediante un análisis exerético y económico, el cual permita cuantificar su relación con algunos parámetros operacionales del horno (relación piedra caliza/combustible, exceso de aire de combustión, entre otros).

## 4 MARCO TEÓRICO

### 4.1 La Piedra Caliza

De acuerdo con Abuhayar (2016), la piedra caliza o caliza, es una roca sedimentaria la cual está mayoritariamente constituida por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y, en menores proporciones, por diferentes minerales como: arcilla, cuarzo, dolomita, entre otros. Es usada para la producción de cal viva, que es un producto que tiene numerosas aplicaciones industriales y agrícolas.

La extracción de la piedra caliza se realiza en minas a cielo abierto por medio de la voladura instantánea ejecutada con dinamita o voladura eléctrica. Luego de esto, la piedra es extraída con tractores y retroexcavadoras para posteriormente ser transportada a las plantas industriales (Ballesteros, 2014).

#### Aplicaciones:

La cal actualmente se considera no sólo como un material de construcción o agrícola sino como un producto químico básico, el cual está presente en casi todos los procesos industriales. A continuación, se mencionan algunas de las aplicaciones de la cal según la empresa Caleras San Juan.

**Tabla 1.** *Aplicaciones de la Cal en la Industria*

<b>Industria</b>	<b>Uso</b>
Minería	Usado como depresor y basificante en la flotación de minerales.
Siderurgia	Usado como escorificante en la fabricación del hierro y el acero.
Construcción	Usado como aglomerante.
Azucareras	Usado para la clarificación jugos de caña Permite controlar el pH en sus procesos.
Papeleras	Se usa en el tratamiento de los efluentes líquidos. También sirve como cubriente del papel blanco.
Potabilización del agua	Regulación de alcalinidad.
Petróleo	Usado en la fabricación de grasas lubricantes con base de cal.
Curtiembres	Usado para depilar y esponjar las pieles.
Refractarios	Usado en la fabricación de ladrillos de magnesita.
Química	Usados en la fabricación de conservantes de alimentos, control del pH, en la obtención de calcio, producción de carburo de calcio, tratamientos de efluentes, entre otros.
Pintura	Usado como carga en pinturas de agua.
Agricultura	Como fertilizante y regulador de pH.

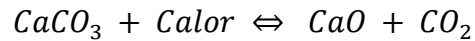
*Nota.* Elaboración propia. Tomado de *Montagna (2016)*.

#### **4.2 Cal (óxido de calcio CaO)**

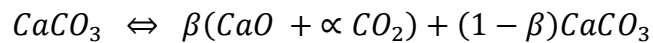
Según Hill & Mason (1997), el óxido de calcio o cal viva es una sustancia alcalina que se produce como resultado de la calcinación de la piedra caliza y se caracteriza por su color blanco o blanco grisáceo. En el proceso de calcinación el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se descompone térmicamente para formar óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Esta

reacción se produce a temperaturas entre 900-1000°C, que son lo suficientemente altas para descomponer el carbonato y emitir una fracción volátil en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

La ecuación teórica para este proceso es:



Sin embargo, debido a las variaciones en las condiciones del proceso, no se puede considera una reacción ideal, por lo cual, es posible encontrar una cantidad remanente de piedra caliza no calcinada, de la forma:



Donde  $\alpha$  es el coeficiente estequiométrico del CO<sub>2</sub> emitido por mol de caliza calcinada y  $\beta$  es la eficiencia de la reacción de calcinación. Esta eficiencia indica la relación entre la cantidad de piedra caliza calcinada y la caliza total que ingresa al horno.

El proceso de calcinación requiere de una gran cantidad de energía térmica. Esta energía puede ser suministrada por diferentes tipos de hornos, como presentado en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Principales Tipos de Hornos para Cal

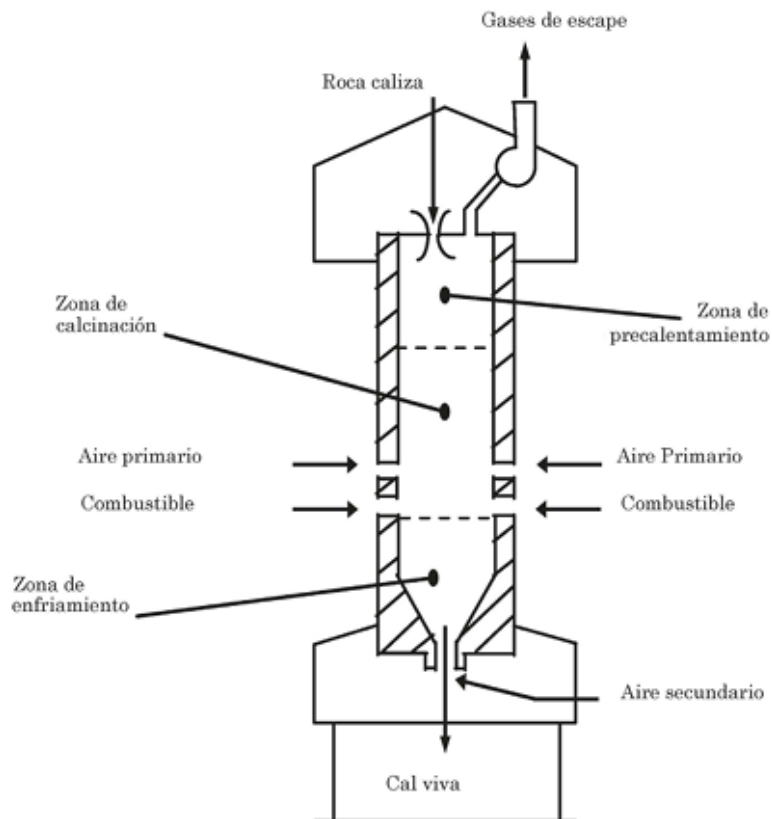
<i>Tipo de Horno</i>	<b>Combustible Usado</b>	<b>Tipo de Producción</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Tipo de Cal Producida</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Costo</b>
<i>Vertical</i>	Carbón mineral Coque Carbón de madera Papel Restos de embalajes Gas o gasóleo Biomasa	Por ciclos	1.500 – 18.000 kg de cal por día	Cal viva de reactividad media y cal hidratada	40.8% Aprox.	37.049 US\$ - 169.350 US\$
<i>Vertical regenerativo de doble cuba</i>	Gas natural	Por ciclos	100 – 800 ton cal/día	Cal viva de alta pureza	55% Aprox.	328.800,00 US\$ - 1.500.000 US\$
<i>Rotativo</i>	Coque pulverizado Carbón pulverizado Gas natural	Continuo	120 – 1200 ton cal/día	Cal dolomítica y cal de alta pureza	80% Aprox.	40.000- 275.000 US\$

*Nota.* Elaboración propia

### 4.3 Tipos de Horno

#### 4.3.1 Hornos Verticales

**Figura 1.** Esquema de un Horno Vertical



*Nota.* Tomado de *Balance de Energía y Energía de un Horno de Cuba Vertical para la Producción de Cal* por Gutiérrez, Martínez (2019).

De acuerdo con Gutiérrez & Martínez (2019), el horno vertical o también llamado horno de cuba vertical está compuesto por un cilindro vertical que tiene tres zonas: la zona de precalentamiento, de calcinación y de enfriamiento. Como se observa en la Figura 1. Esquema de un horno vertical., en la parte superior del horno se encuentra el área por donde se suministra la piedra caliza y salen los gases de escape.

Una vez la piedra caliza supera la temperatura de reacción ( $900^{\circ}\text{C}$ ), entra en la zona de calcinación. En esta área se suministra el combustible, por lo que esta zona además de realizar la calcinación de la piedra caliza también ocurre la combustión de los diferentes combustibles que se pueden utilizar como gas natural, carbón mineral, carbón vegetal, entre otros. En la parte inferior del horno se encuentra la zona de enfriamiento, en donde la cal viva se enfría por medio de aire secundario que entra en contraflujo (Lopez & Tapias, 2020).

En el grupo de los hornos verticales encontramos los hornos de tipo artesanal. De acuerdo con Spiropoulos, estos son hornos de producción discontinua (se cuece un volumen de piedra por vez) y tienen alimentación mixta, donde se cargan alternando capas de combustible y piedra. En la Figura 2 se muestra un horno vertical artesanal en Sudán:

**Figura 2.** *Horno Artesanal en Sudán*



*Nota.* Tomado de *How to calculate the energy efficiency of your lime burning process* por Neville (1997).

Algunos hornos artesanales cuentan con un conducto para liberación de gases de combustión, como el mostrado en la Figura 3, el cual se encuentra ubicado en Zimbabue y es construido con ladrillos.

**Figura 3.** *Horno Vertical en Zimbabwe*



*Nota.* Tomado de *How to calculate the energy efficiency of your lime burning process* por Neville (1997).

Entre los hornos verticales también se encuentran unos de mayor tecnificación y capacidad de producción. De acuerdo con la empresa fabricante de hornos Maerz, estos hornos pueden tener una capacidad entre 50 – 300 toneladas de cal por día y es usado para producir cal de reactividad baja y media con una granulometría entre 10 – 100 milímetros.

#### **4.3.2 Hornos Verticales de Corriente Paralela Regenerativos**

Estos hornos tienen dos ejes o cubas verticales interconectadas las cuales son encendidas en secuencia para alcanzar una gran eficiencia energética. Según Alcántara (2018), esta configuración permite la calcinación de la materia prima la cual ingresa al horno en una corriente que resulta paralela a la corriente de gases calientes que circulan en el horno; y el calentamiento regenerativo del aire de combustión en la cuba de calcinación. De la misma manera, la materia prima es precalentada en la segunda cuba (en la que no tiene lugar la calcinación) por efecto de

la mezcla de los gases de combustión y del aire de refrigeración. Tienen una capacidad de 300 - 800 toneladas de cal por día y pueden ser construidos para utilizarse con combustibles gaseosos, líquidos o sólidos pulverizados en la combustión (Fundación Entorno, 2000)

Estos hornos tienen dos principios de operación, según Alcántara (2009):

- La calcinación de la cal es alcanzada a temperaturas de entre 900 y 1100°, ideales para producir cal de media y alta reactividad con bajo porcentaje de CO<sub>2</sub> residual.

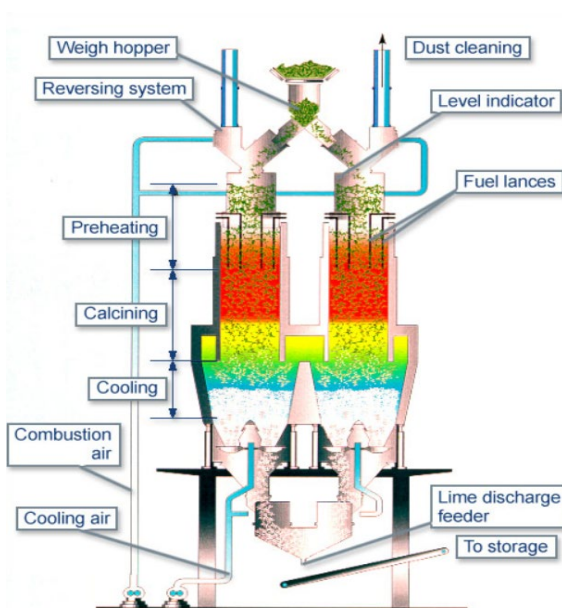
Los ejes del horno son cargados alternativamente desde la parte superior. El combustible entra en uno de los ejes (el eje de combustión) en la parte más alta de la zona de la calcinación. Los gases de la combustión fluyen hacia abajo, en forma paralela a la cal calcinada y se transportan por la parte inferior al eje paralelo (en el que no está ocurriendo combustión). Estos gases fluyen hacia la parte superior y precalentar la piedra caliza que ingresa al horno, para finalmente salir a una temperatura promedio de 100°C. De esta forma, el calor transferido en el precalentamiento por los gases calientes a la piedra caliza es recuperado en cada siguiente ciclo. Al finalizar cada ciclo, se intercambia el uso de cada eje, de modo que el de combustión pasa a ser el del precalentamiento y viceversa. Este ciclo de cambio entre el modo calcinación y modo precalentador es llamado “inversión” y dura entre 8 a 15 minutos (AGT Mining., 2015). Finalmente, la cal viva es descargada por la parte inferior del horno para ser enfriada y almacenada.

**Figura 4.** *Horno Regenerativo Marca Maerz en Caleras San Juan, Argentina*



*Nota.* Tomado de *Caleras San Juan* por Montagna (2016).

**Figura 5.** *Partes de un horno de doble eje regenerativo*



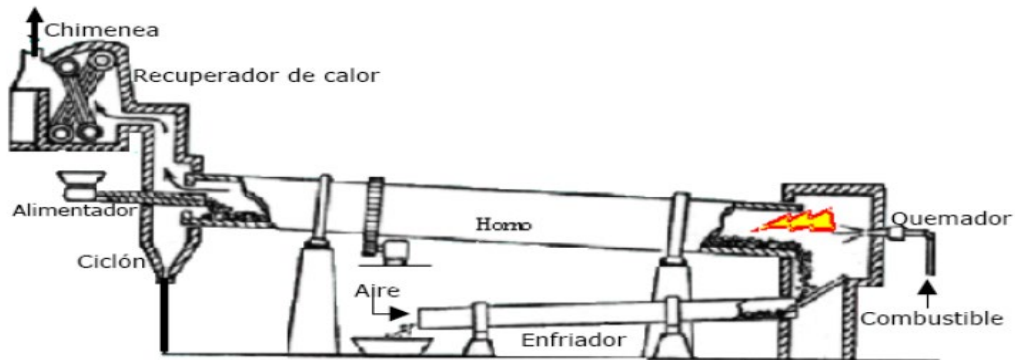
*Nota.* Tomado de *Kiln types* por EULA (2023).

### 4.3.3 Horno Rotativo

Un horno rotativo está compuesto por un cilindro inclinado (de 3 a 4 grados) con respecto a la horizontal, que gira sobre su eje longitudinal durante la combustión. Estos hornos pueden alcanzar una longitud de 100 metros.

En la Figura 6, se presenta un diagrama esquemático de un horno rotativo en el que la piedra caliza es alimentada por la parte superior a través de un ducto integrado a la recámara del horno o una tolva mientras que el aire es introducido a contracorriente en la parte inferior. El cilindro del horno gira y su inclinación propicia el transporte lento de la caliza en todo su recorrido dentro del horno. Luego de la calcinación, la cal caliente se descarga en el enfriador en donde disipa su energía a un flujo de aire que es precalentado (European Lime Association., 2023). Estos hornos cuentan con filtros y ventiladores para la disposición de los gases de combustión.

**Figura 6.** Partes Principales de un Horno Rotatorio para Cal



*Nota.* Tomado de *Redimensionamiento de las cámaras de combustión del horno de cuba de la Planta de Cal de Antillana de Acero* por Echavarría (2009).

De acuerdo con la Asociación Europea de la Cal (EuLA, por sus siglas en inglés), la capacidad de los hornos rotativos oscila entre 120 y 800 toneladas de cal por día y son

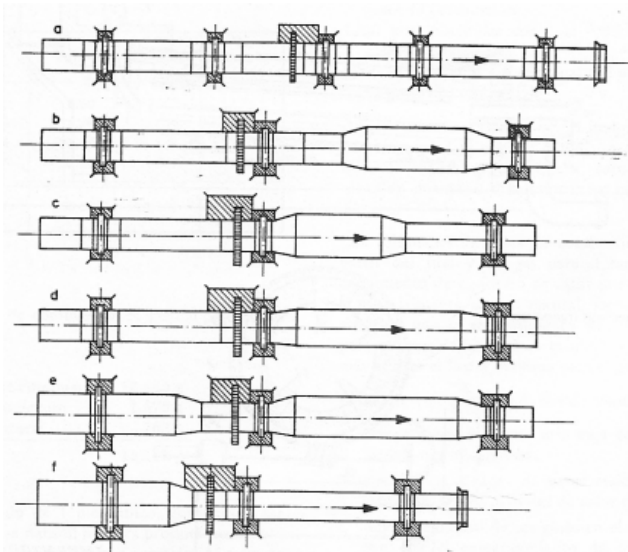
alimentados con piedras de 15 a 40 milímetros. Los combustibles más utilizados en estos hornos son: carbón o coque de petróleo pulverizados y gas natural (European Lime Association., 2023).

**Figura 7.** *Horno Rotatorio en Irán*



*Nota.* Tomado de *Portal de ventas Henan Zhengzhou Mining Machinery Ltd.*

Según Ramayo (2018), dependiendo de la aplicación industrial, existen diferentes configuraciones para el diseño del cilindro del horno, que permiten tener diferentes tiempos de residencia del material en su interior según las necesidades del proceso, las cuales van desde zonas sinterización, calcinación o precalefacción ensanchadas.

**Figura 8.** *Tipos de Hornos Rotatorios*

*Nota.* Tomado de *Dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de clinker de cemento* por Ramos (2018).

Los cambios de sección del cilindro no son muy usados ya que además de tener mayores costos de fabricación, generan desplazamientos irregulares en el horno y producen retenciones de material.

#### 4.4 Producción de Cal

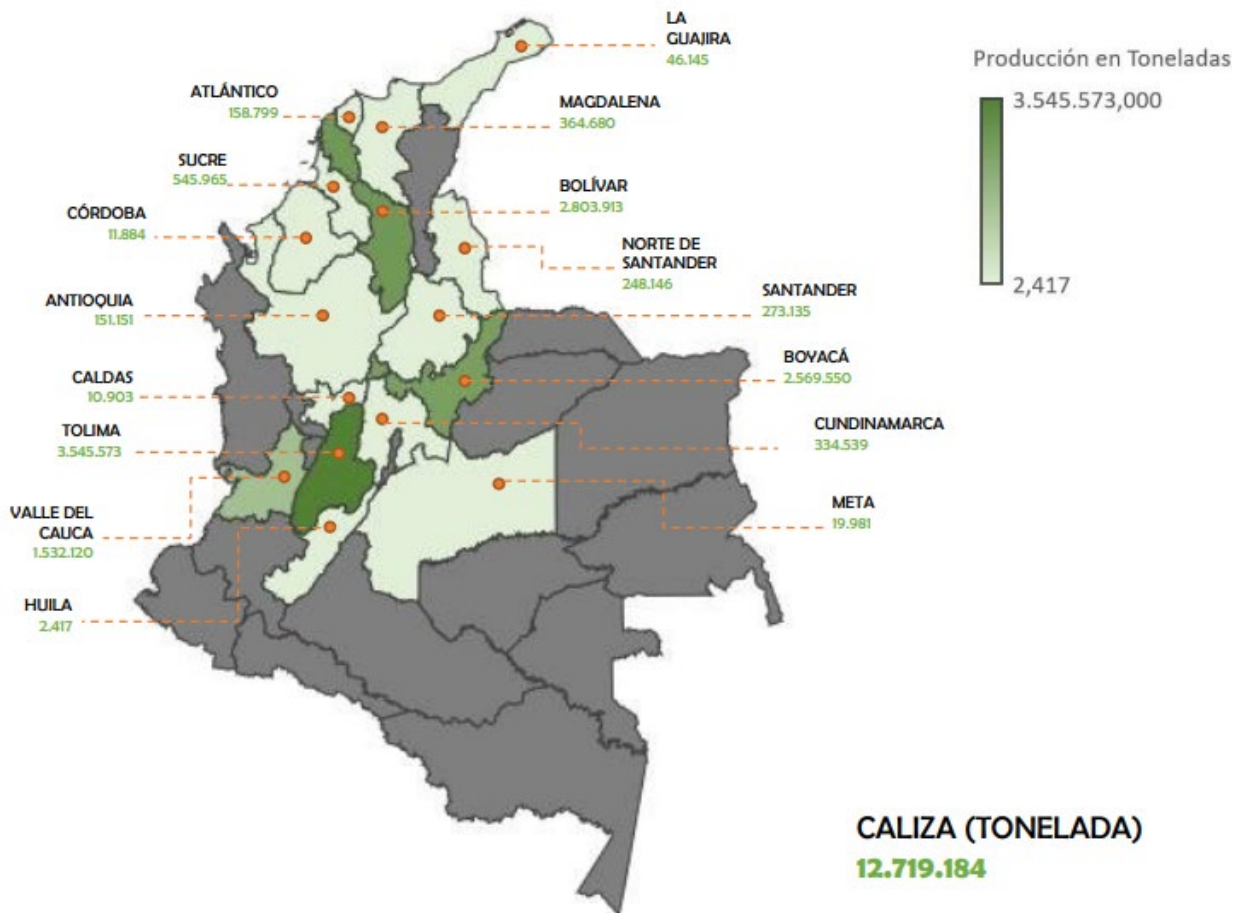
Según la OEC The Observatory of Economic Complexity, en este año la cal viva fue el producto número 894 más comercializado en el mundo, con un total de US \$1,18MM y en la Tabla 3 se muestran los principales productores a nivel mundial.

**Tabla 3.** Principales Productores Mundiales de Cal

<b>País</b>	<b>Producción</b>
Francia	US \$134M
Alemania	US \$109M
Malasia	US \$63,4M
Bélgica	US \$60,9M
Vietnam	US \$54,1M

*Nota.* Elaboración propia. Tomado de *The Observatory of Economic Complexity (2021)*.

En Colombia, los departamentos con mayor producción en el año 2016 fueron Tolima, Bolívar, Boyacá (Cales Boyacá - Tibasosa; Suminco LTDA - Nobsa) y Valle del Cauca (Figura 9).

**Figura 9.** Producción de Piedra Caliza en Colombia

*Nota.* Tomado de *Agencia Nacional de Minería (2016)*.

Los principales productores de cal en Colombia según INFORMA COLOMBIA S.A. (2013), son:

- Agrícola Calaguala LTDA (Villavicencio, Meta)
- Agrícola California Sas (Bogotá)
- Agrícola Aragón Calderón S A S (Saldaña, Tolima)
- Calcáreos Industriales Y Agrícolas Ltda (Envigado, Antioquía)
- Calidad En Servicios Agrícolas De Colombia S A S (Pacora, Caldas)
- Cal S A S (Cali, Valle)

- Comercializadora Cal Y Canto S A S (Santa Rosa, Bolívar)
- Cal Oncológicos Cia Ltda (Bucaramanga, Santander)
- Cal Constructores Asociados LTDA En Liquidación (Barrancabermeja, Santander)
- Grupo Cal S A S (Cereté, Córdoba).

En Nobsa, se utilizan hornos verticales artesanales revestidos de ladrillos (Figura 10).

Estos hornos tienen una altura media de 5 metros y un diámetro seccional de alrededor de 3 metros. Estos hornos normalmente se construyen en laderas de las montañas para facilitar el acceso en la parte superior (para el llenado) e inferior (para el vaciado) y, al mismo tiempo garantizar una estructura estable.

**Figura 10.** *Horno Artesanal Nobsa, Boyacá*



*Nota.* Elaboración propia.

#### **4.5 Descripción del Proceso**

A continuación, se presenta una breve descripción del proceso de calcinación de la piedra caliza en cal, en hornos artesanales de eje vertical.

**Figura 11.** *Extracción de piedra de la cantera.*



*Nota.* Elaboración propia.

1. El proceso de la producción de cal inicia con extracción de la piedra de la cantera, estas canteras o minas están ubicadas en los cerros del municipio de Nobsa, Tibasosa y Firavitoba.

**Figura 12.** *Piedra cargada en volquetas.*



*Nota.* Elaboración propia.

2. Luego esta piedra es cargada en volquetas por una retroexcavadora la cual carga las rocas de un tamaño de aproximadamente 40 cm de diámetro.

**Figura 13.** *Transporte del mineral hacia los hornos.*



*Nota.* Elaboración propia.

3. Enseguida la piedra es transportada hacia los hornos los cuales están ubicados en la vereda Las Caleras del municipio de Nobsa. Cada volqueta transporta aproximadamente 14 toneladas de materia prima.

**Figura 14.** *Piedra caliza descargada.*



*Nota.* Elaboración propia.

4. La piedra caliza es descargada a un lado del horno para iniciar con su tratamiento.

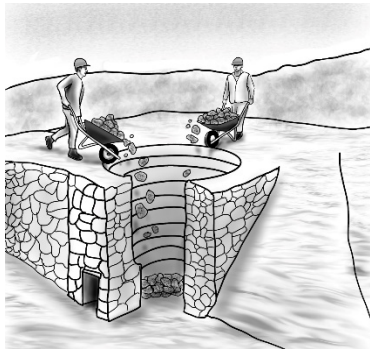
**Figura 15.** *Proceso de trituración de la piedra.*



*Nota.* Elaboración propia.

- Obreros realizan el proceso de trituración o picado de la piedra, en este paso los trabajadores reducen el tamaño de la piedra de manera manual con almádenas hasta reducir el diámetro de la roca a aproximadamente 10 centímetros y facilitar su manipulación. En este proceso se tratan 4 viajes de volqueta lo que equivale a aproximadamente 58 toneladas de piedra caliza.

**Figura 16.** *Preparación del combustible*



*Nota.* Elaboración propia.

- Luego de tener la piedra en el diámetro adecuado se prepara el combustible el cual es una mezcla entre carbón y coque, para este proceso se usan 7 toneladas de coque y 500kg de

carbón (el cual se coloca únicamente en la primera capa debido a que es un material más volátil que el coque).

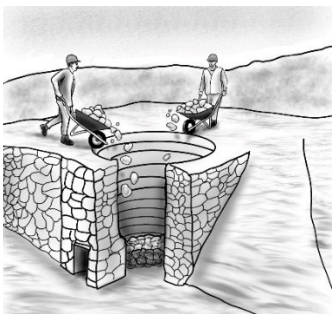
**Figura 17.** *Llenado del horno.*



*Nota.* Elaboración propia.

7. Se inicia con el llenado del horno por capas de aproximadamente 50 centímetros o 7 ladrillos (ellos son el recubrimiento del horno) cada una, la primera capa es una mezcla de carbón y coque en la cual se usan los 500 kilogramos de carbón y se completa con coque hasta alcanzar la altura requerida. Las dimensiones del horno de 25 toneladas son aproximadamente 2,5 metros de diámetro por 5 metros de profundidad.

**Figura 18.** *Llenado de la piedra caliza.*

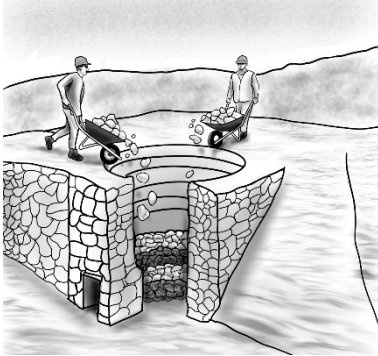


*Nota.* Elaboración propia.

8. Luego de estar cargada la primera capa de combustible se inicia con el llenado de piedra caliza que de igual manera se hace una capa de 50 centímetros o 7 ladrillos, esta piedra

ingresa al horno en el tamaño previamente preparado por los trabajadores y con la ayuda de carretillas.

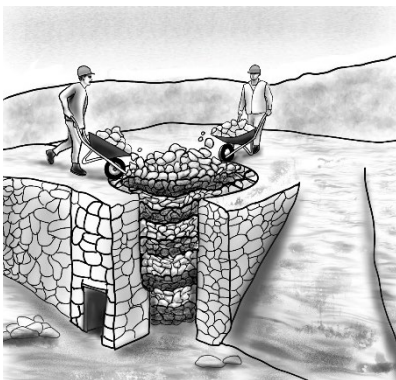
**Figura 19.** *Llenado del horno en capas*



*Nota.* Elaboración propia.

9. Se continúa llenando el horno por medio de capas de 50 centímetros o 7 ladrillos, una de combustible (coque) y luego una de piedra caliza.

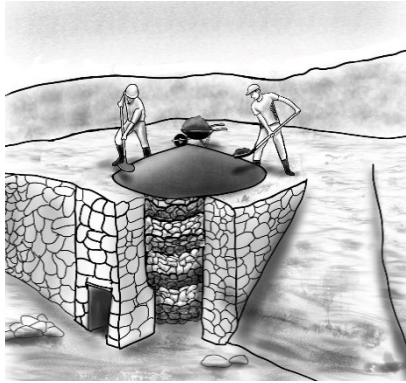
**Figura 20.** *Llenado del horno hasta 10 capas.*



*Nota.* Elaboración propia.

10. Se repite el proceso hasta completar 10 capas, 5 de combustible y 5 de piedra caliza, con esta cantidad el horno es llenado hasta la parte superior.

**Figura 21.** *Sellado del horno con arcilla.*



*Nota.* Elaboración propia.

11. Para finalizar con el cargue del horno, este es sellado con una capa de arcilla húmeda la cual le da un cierre hermético y le ayuda a mantener la temperatura interna.

**Figura 22.** *Ignición de la capa inferior del horno.*



*Nota.* Elaboración propia.

12. Para iniciar el fuego se usa leña de eucaliptus la cual es introducida por la parte inferior del horno con el fin de iniciar el fuego en el carbón que está en la primera capa y que posteriormente el coque alcancé su temperatura e inició su combustión.

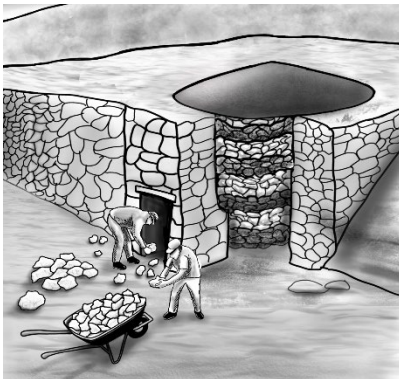
**Figura 23.** *Calcinación de la piedra caliza*



*Nota.* Elaboración propia.

13. Luego de iniciar con el fuego el horno se deja por 7 días cocinando la piedra en este tiempo se alcanzan temperaturas máximas de 1000 °C.

**Figura 24.** *Extracción de la cal.*



*Nota.* Elaboración propia.

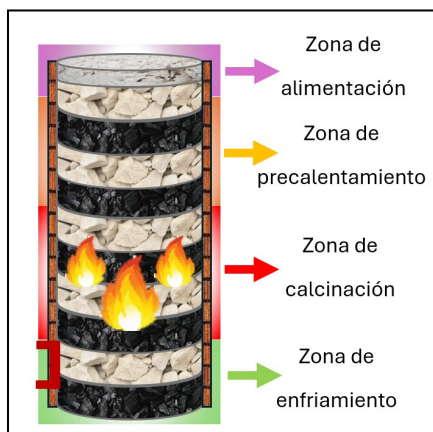
14. Para finalizar, la cal es extraída por la parte inferior del horno, en este punto se evidencia la pérdida de masa de las rocas y su facilidad para reaccionar con el agua. De allí es trasladada a un molino en el cual se finaliza el proceso dependiendo de los requerimientos del cliente.

#### 4.6 Calcinación

En el proceso de producción de cal en un horno vertical, se pueden encontrar cuatro diferentes zonas (que usualmente no están separadas y no se pueden distinguir una de otra) cuyas proporciones y contornos son la base del diseño de un horno vertical. Desde la parte superior del horno hasta el fondo, encontramos:

- Alimentación: zona que está localizada en la parte superior del horno y es por donde se ingresan las diferentes materias primas.
- Zona de precalentamiento: en esta zona, los aires de combustión circulan por el lecho, calentando el material antes de ser calcinado. Esta zona termina donde la piedra caliza alcanza la temperatura de disociación y da lugar a la calcinación (Hill & Mason, 1997).
- Zona de calcinación: en esta zona se da la combustión del combustible y la calcinación de la piedra caliza.
- Zona de enfriamiento: en esta zona existe una entrada de aire natural o provocado que enfría la cal, y es donde se realiza la descarga del horno.

**Figura 25.** *Diferentes zonas del horno*



*Nota.* Elaboración propia.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 Descripción de los Materiales

#### a. Piedra caliza:

La piedra caliza que recolectamos en las minas de Nobsa y sus alrededores para la producción de cal es una roca sedimentaria compuesta principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Para la realización de las pruebas de laboratorio usamos piedra previamente fragmentada ya que el material como es extraído de la mina es muy difícil de transportar y manipular debido a su tamaño y peso. Cabe aclarar que el tamaño de fragmentación que utilizamos fue el mismo que usan en el horno para su calcinación. Este material tiene un color gris con algunas betas de color amarillo y blanco, con un peso aproximado de entre los 200 y 400 gramos y un diámetro entre los 5 a 12 cm, no contiene restos de materia orgánica como tierra, lodo, pasto o material vegetal, también se utilizó seco (libre de humedad generada por la lluvia o factores externos). Se analizaron aproximadamente 5 kg de este material.

**Figura 26.** *Muestra de piedra caliza*



*Nota.* Elaboración propia.

**b. Cal:**

La cal que usamos para nuestras pruebas fue obtenida de la producción local que usa como materia prima la piedra caliza de la región. Se observa que es de un color gris claro o beige y que en contacto con el agua genera una efervescencia. Para las pruebas usamos la cal luego de ser vaciado el horno sin ningún tipo de proceso salvo su calcinación, a la cual se le denomina coloquialmente como cal viva. Se emplearon rocas de una masa aproximada de 100 a 250 gramos y un diámetro de 3 a 8 cm, aunque por la fragilidad este material al momento de ser transportado se fragmento aún más y se generó una harina. Se analizaron aproximadamente 5 kg de este material.

**Figura 27.** *Muestra de Cal*

*Nota.* Elaboración propia.

**c. Combustible:**

Para el proceso de transformación de la piedra caliza en un horno vertical artesanal de 25 toneladas se utilizan 4000 kilogramos de coque y 400 kilogramos de carbón. Para nuestras pruebas de laboratorio se analizó una muestra que consistía en una mezcla 10:1 de Coque y Carbón, Para la prueba se llevaron los dos materiales en muestras cercanas a los 5 kilogramos, las cuales fueron entregadas en al laboratorio en rocas de 6 a 10 cm y una masa entre 150 y 250 gramos. El laboratorio se encargó de la trituración y la elaboración de la mezcla en la proporción indicada.

**Figura 28.** *Mezcla de combustible compuesta de coque y carbón en una relación 10:1.*



*Nota.* Elaboración propia.

**5.2 Pruebas de Laboratorio****5.2.1 Descripción de las Pruebas Realizadas**

Se llevaron a cabo tres pruebas de fluorescencia de rayos X (FRX): a la piedra caliza, calcáreo y cenizas del combustible; y una prueba de caracterización (PC) al combustible (mezcla 10:1 coque-carbón).

A través de las pruebas de fluorescencia de rayos X (FRX) fue posible identificar la composición química de los materiales, detectando elementos como el calcio, el carbono y el oxígeno, entre otros. Esta técnica se base en la emisión de rayos X secundarios o fluorescentes que se generan cuando un material es excitado mediante la exposición a rayos X de alta energía o rayos gamma. Su uso es común en el análisis químico y elemental de distintos materiales, incluyendo metales, cerámicas, vidrios y componentes de la construcción, y también tiene aplicaciones relevantes en campos como la geoquímica, la arqueología y la ciencia forense. (Rosell, 2013)

Por otro lado, la prueba de caracterización del coque proporcionó información sobre su contenido de carbono, volátiles y otros componentes relevantes para su uso como combustible en los hornos de cocción de caliza. Los resultados de estas pruebas son fundamentales para comprender la calidad de los materiales y su impacto en el proceso de producción de cal en Nobsa, Boyacá.

### ***5.2.2 Prueba de Caracterización del combustible (PC):***

#### **Código de la Muestra: PC-20240313-009**

Las muestras fueron suministradas al laboratorio IRME de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC y se utilizaron diversos equipos para la realización de los análisis, entre los cuales se incluyen:

- Balanza analítica Sartorius CPA124S (120 g  $\pm$  0.1 mg)
- Horno GEMMYCO #YCO-N01
- Mufla TERRÍGENO D8-2235
- Sulfurómetro LECO S144 DR
- Quemador de gas tipo mechero Bunsen.

- Calorímetro Parr 1261

Los análisis realizados en la muestra de carbón y coque incluyeron: determinación de la humedad en la muestra de análisis de carbón, determinación de cenizas en muestras de carbón, análisis de materia volátil en muestra de carbón, determinación del poder calorífico bruto de carbón, determinación del azufre total en muestra de carbón y determinación del índice de hinchamiento libre del carbón.

Se realizaron diversos análisis en las muestras de carbón y coque mediante el uso de instrumentos especializados, con la finalidad de adquirir datos exactos acerca de las características y la estructura de dichas muestras.

### ***5.2.3 Análisis por FRX de las Cenizas:***

#### **Código de la Muestra: FRX-20240313-011**

Las muestras fueron suministradas al laboratorio IRME de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC como una mezcla 10:1 de Coque y Carbón, pulverizado, pasante de la malla 60, siguiendo las indicaciones de la orden de servicios. El material se describe como cenizas de la mezcla con proceso previo de retiro de humedades

#### **Descripción de equipos (FRX):**

- Analizador FRX
- Epsilon 4 Malvern Panalytical
- Molino bolas de tungsteno
- FRITSCH 6 Classic
- Prensa manual
- Vaneox fluxana, capacidad: 25 ton

#### **5.2.4 *Análisis por FRX Piedra Caliza:***

##### **Código de la Muestra: FRX-20240313-009**

Las muestras fueron suministradas al laboratorio IRME de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC para preparación de secado hasta masa constante, cuarteo, pulverización en molino de bolas, tamizado y homogenización. Al laboratorio de materiales se transfiere la muestra preparada a malla 200 como material en polvo de peso aproximado de 50 gramos.

##### **Generación de pastilla prensada:**

Se tomaron 10 gramos del pasante de la malla 200 y se mezcló en proporción 10:1 con crema espectrométrica; la mezcla se homogenizó durante 5 minutos y se prensó a 15 toneladas de presión.

##### **Descripción de equipos (FRX):**

1. Analizador FRX
2. Epsilon 4 Malvern Panalytical
3. Molino bolas de tungsteno
4. FRITSCH 6 Classic
5. Prensa manual
6. Vaneox fluxana, capacidad: 25 ton

#### **5.2.5 *Análisis por FRX de la Cal:***

##### **Código de la Muestra: FRX-20240313-010**

Las muestras fueron suministradas al laboratorio IRME de la universidad pedagógica y tecnológica de Colombia UPTC para preparación de secado hasta masa constante, cuarteo, pulverización en molino de bolas, tamizado y homogenización. Al laboratorio de materiales se

transfiere la muestra preparada a malla 200 como material en polvo de peso aproximado de 50 gramos.

#### **Generación de pastilla prensada:**

Se tomaron 10 gramos del pasante de la malla 200 y se mezcló en proporción 10:1 con crema espectrométrica; la mezcla se homogenizó durante 5 minutos y se prensó a 15 toneladas de presión.

#### **Descripción de equipos (FRX):**

- Analizador FRX
- Epsilon 4 Malvern Panalytical
- Molino bolas de tungsteno
- FRITSCH 6 Classic
- Prensa manual
- Vaneox fluxana, capacidad: 25 ton

### **5.3 Condiciones operacionales del horno de calcinación.**

Para realizar un análisis termodinámico que permita evaluar el estado energético y exergético actual de los hornos artesanales de calcinación en el Municipio de Nobsa, es necesario mencionar algunos de los parámetros operativos y dimensionales de los hornos de eje vertical:

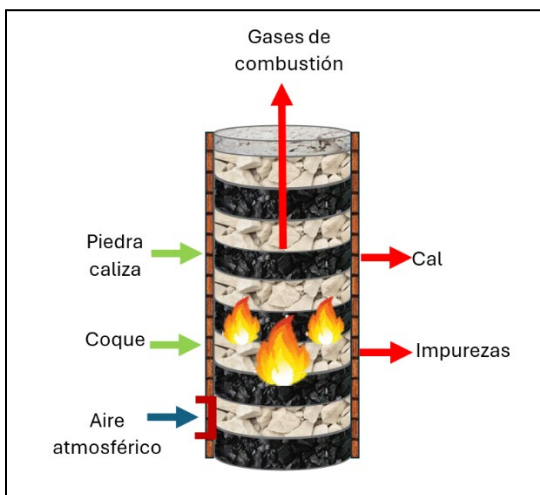
- Dimensiones: 2.50m de diámetro y 5m de altura.
- Capacidad: 25 toneladas de cal/lote.
- Producción: Por lotes.

Al horno ingresa una cantidad determinada de piedra caliza y coque, y se espera cierta cantidad de cal. No existen flujos variables de entrada o salida en el tiempo, sino que todo el material entra una única vez y, al finalizar el proceso, lo que queda en el horno representa los productos de la calcinación de la piedra caliza y de la combustión del coque.

- Adicionalmente, para simplificar el proceso de cálculo requerido en el análisis termodinámico se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:
  - Se evalúa el horno haciendo uso de un modelo cero dimensional simplificado, asumiendo condiciones uniformes de temperatura y propiedades en todo el volumen de control en un balance de energía global (Cengel & Boles, 2019).
  - Dado que las temperaturas en el proceso de calcinación son elevadas y que los gases de combustión se producen a bajas presiones, es razonable considerar el comportamiento de los gases como ideales, minimizando las desviaciones respecto a los gases reales (Çengel, 2015).
  - En sistemas termodinámicos como el horno de calcinación, las energías cinética y potencial suelen ser despreciables frente a los términos de energía térmica (Çengel & Boles, 2019).
  - Las condiciones estándar se definieron así: temperatura de referencia de 25°C y presión de referencia de 1 atm.
  - La humedad presente en el combustible se considera inerte en la reacción química, pero debe tenerse en cuenta en el balance energético, principalmente para determinar la energía necesaria para su evaporación. (Van Wylen, Sonntag, & Borgnakke, 1994)

- Las cenizas, tratadas como dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), tampoco participan en la reacción química, pero contribuyen en la transferencia térmica del sistema. Esto se justifica gracias a las pruebas de laboratorio realizadas para determinar la composición de las cenizas.
- Se asume que una fracción del nitrógeno presente en el combustible se convierte en  $\text{NO}$  debido a las altas temperaturas del horno mientras que el resto permanece en forma de  $\text{N}_2$ . El nitrógeno presente en el aire atmosférico se considera inerte durante la reacción (Glassman & Yetter, 2018)
- La descomposición total del  $\text{CaCO}_3$  es esperable a temperaturas superiores a  $900^\circ\text{C}$ , como se observa en hornos industriales (Boynton, 1980). Para este estudio, la temperatura de descomposición de la piedra caliza se fijó en  $1000^\circ\text{C}$  o  $1273\text{K}$ . El análisis de laboratorio confirma la ausencia de trazas significativas de  $\text{CaCO}_3$  en los productos finales.
- Este estudio se centra en la fase de calcinación, que es la etapa más intensiva en términos energéticos y donde ocurre la transformación más significativa del material (Peray, 1986).
- Las paredes del horno delimitan el volumen de control de este estudio:

**Figura 29.** *Volumen de control*



*Nota.* Elaboración propia

### 5.3.1 Balance de Masa

A continuación, se presenta el balance de masa aplicado en el horno para identificar las cantidades de reactivos y productos durante el proceso. De acuerdo con Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele (2013), es posible expresar el balance de conservación de masa en el sistema:

1) Todo lo que entra y sale del horno:

$$m_{pc} + m_{fuel} + m_{aire} = m_{cal} + m_{gases} + m_{impurezas}$$

Donde:

$m_{pc}$  es la masa total de piedra caliza que ingresa al horno.

$m_{fuel}$  es la masa de combustible usado.

$m_{aire}$  es la masa de aire de combustión.

$m_{cal}$  es la masa de cal producida.

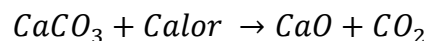
$m_{gases}$  es la masa total de gases de combustión liberados.

$m_{impurezas}$  es la masa de impurezas totales generadas.

2) Calcinación:

$$m_{pc} = m_{cal} + m_{CO_2}$$

Como se mencionó previamente, el proceso de calcinación considera la reacción de descomposición de la piedra caliza:



Esta reacción indica que, en un proceso de calcinación perfecto, por cada mol de  $CaCO_3$  calcinada, son producidos un mol de  $CaO$  y un mol de  $CO_2$ .

De acuerdo con el productor de cal, para el horno evaluado las cantidades de piedra caliza y de combustible son usualmente de 40 y 7.5 toneladas, respectivamente; lo que da lugar a una producción de aproximadamente de 25 toneladas de cal viva.

Considerando las masas molares:

- Masa molar de  $CaCO_3 = 100.09 \left[ \frac{g}{mol} \right]$
- Masa molar de  $CaO = 56.08 \left[ \frac{g}{mol} \right]$

La relación estequiométrica indica que, por cada 100.09 kg de  $CaCO_3$ , se obtienen 56.08kg de CaO. Lo cual, si se escala a una carga del horno, sería:

$$40t \text{ CaCO}_3 \times \frac{56.08}{100.08} \approx 22.42t \text{ de CaO}$$

Sin embargo, el productor reporta una producción de 25 toneladas de cal, lo cual excede el rendimiento estequiométrico del cálculo en condiciones ideales.

Esta discrepancia entre en el rendimiento teórico y el real puede atribuirse, en parte, a que la cal comercial no siempre corresponde a óxido de calcio puro (CaO), sino que puede incluir impurezas, materiales no calcinados y residuos sólidos inertes. Según la NTC 4046:2019, la cal viva puede contener hasta un 15% de residuo en peso y un máximo de 5% de impurezas como sílica, alúmina y óxido de hierro.

Esto sumado a posibles pesajes imprecisos (sobreestimaciones) o a que se confunde la capacidad nominal del horno con la producción real por lote.

## 3) Combustión:

El balance de masa de la reacción de combustión se realizó en primer lugar en las condiciones de aire teórico. Para ello se utilizaron los resultados del análisis último de la composición del combustible. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.

Partiendo de la composición porcentual en masa del combustible aportada por las pruebas de laboratorio, y haciendo uso de las masas moleculares de cada elemento, se realiza la conversión a moles mediante la relación:

$$N_i = \frac{m_i}{M_i}$$

Donde:

$N_i$  es el número de moles de cada elemento [kmol].

$m_i$  es la masa de cada elemento [kg].

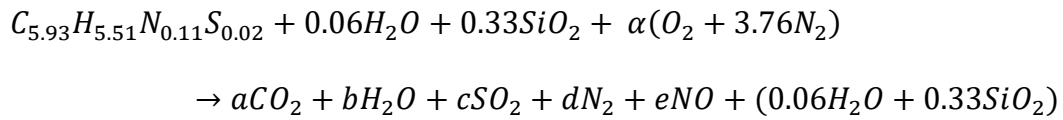
$M_i$  es la masa molar [kmol/kg].

**Tabla 4.** Conversión porcentaje a masa.

Elemento	% kg/kg	% kmol/kmol
Carbono	71.2	5.93
Hidrógeno	5.51	5.51
Azufre	0.6	0.02
Oxígeno	0	0
Nitrógeno	1.5	0.11
Humedad	1.07	0.06
Cenizas	20.12	0.33
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>11.95 moles</b>

*Nota.* Elaboración propia.

Posteriormente, se escribe la reacción química que describe la combustión del coque, usando la composición demostrada en los resultados de los análisis de laboratorio realizados:



Con los coeficientes de los compuestos del combustible, se realiza el balance de masa que permite encontrar el valor de  $\alpha$ , que indica el número de moles de aire atmosférico para que se lleve a cabo la combustión completa del combustible.

Carbono:

$$5.933 = a$$

Hidrógeno:

$$5.51 = 2 \times b$$

Oxígeno:

$$2 \times \alpha = (2 \times a) + b + (2 \times c) + e$$

Nitrógeno N<sub>2</sub> (proveniente del aire atmosférico):

$$\alpha \times 3.76 = d$$

Azufre:

$$0.01875 = c$$

Nitrógeno (proveniente del combustible):

$$0.1071 = e$$

Como resultado de esto, se encuentra que el valor de  $\alpha$  es 7.383. A partir de la reacción estequiométrica y del valor de aire teórico, se procede a determinar el balance estequiométrico considerando la composición de los gases de combustión.

Para esto, fue necesario tomar datos de la literatura debido a las dificultades técnicas y presupuestales para realizar un análisis de la composición de los gases de combustión en el horno de estudio. La elección de esa composición se justifica porque hay ciertas similitudes entre la composición del combustible de este estudio y la del estudio de ALCANTARA et al. (2018), así:

**Tabla 5.** *Composición del combustible.*

Elemento	Este estudio $\left[\% \frac{kg}{kg}\right]$	Alcántara $\left[\% \frac{kg}{kg}\right]$
Carbono	71.2	74.5
Hidrógeno	5.51	1.30
Azufre	0.6	1
Oxígeno	0	0
Nitrógeno	1.5	1.6
Humedad	1.07	9.7
Cenizas	20.12	11.9
	PCI 24335.52 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	PCS 28836 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

*Nota.* Elaboración propia. Tomado de Alcántara (2018).

Si bien no exactamente la misma composición, las similitudes se asumieron como lo suficientemente destacables como para el desarrollo de este estudio. El análisis de gases planteado por Alcántara (2018) es:

**Tabla 6.** *Análisis de gases planteado por Alcántara*

Elemento	Concentración [ppm]
Monóxido de carbono CO	3986.79
Oxígeno O2	2.43
Dióxido de azufre SO2	346.13
Monóxido de nitrógeno NO	41.21

*Nota.* Elaboración propia. Tomado de *Alcántara (2018)*.

Para trabajar con estos datos, es necesario hacer la conversión de ppm a fracción molar multiplicando cada valor  $\times 10^{-6}$ , obteniendo así la fracción molar de cada uno de los productos.

$$y_i = ppm \times 10^{-6}$$

Con estos datos adicionales, se puede plantear nuevamente el sistema de ecuaciones que resuelve el balance de masa, de esta forma:

Carbono:

$$5.933 = a + b$$

Hidrógeno:

$$5.51 = 2 \times c$$

Oxígeno:

$$2 \times \alpha \times \varepsilon = (2 \times a) + b + c + (2 \times d) + (2 \times f) + g$$

Nitrógeno N2 (aire atmosférico):

$$\alpha \times 3.76 \times \varepsilon = e$$

Azufre:

$$0.01875 = d$$

Nitrógeno (combustible):

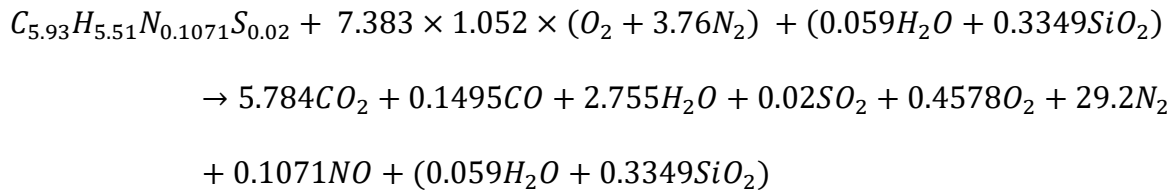
$$0.074 = g$$

Análisis de gases:

$$y_{NO} = \frac{1.3}{a + b + c + d + f}$$

Como resultado de esto, se encuentra que el valor de  $\varepsilon$  es 1.052.

Luego de hacer uso de estos datos para desarrollar el sistema de ecuaciones que resuelve el balance de masa de la combustión, se reescribe la ecuación que modela la combustión:



### 5.3.2 Balance de Energía

Para el planteamiento y desarrollo del balance de energía, se fijaron las temperaturas de salida de la cal ( $T_{out_{prod}}$ ) y los gases de combustión ( $T_{out_{gases}}$ )

$$T_{out_{prod}} = 673 [K];$$

$$T_{out_{gases}} = 623 [K];$$

*Nota:* Basado en Alcántara (2018).

Para algunos cálculos se necesitará el  $Cp_i$  de algunos compuestos, para lo cual se usarán las fórmulas planteadas para cada uno de ellos con la temperatura como variable según la Perry's chemical engineers' handbook (2019).

Teniendo en cuenta la primera ley de la termodinámica, es necesario identificar las interacciones de energía en el volumen de control, por lo que se tiene que:

$$E_{entrada} + E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$E_{fuel} = E_{pc} + E_{prod} + E_{rxn} + E_{conv} + E_{rad} + E_{gases} + E_{vap} + E_{unb}$$

Donde, según Alcántara (2018):

- $E_{fuel}$  es la energía total suministrada por la combustión del coque: que es la masa total de combustible empleado multiplicada por su poder calorífico inferior.

$$E_{fuel} = m_{fuel} * PCI$$

- $E_{pc}$  es la energía sensible suministrada a la piedra caliza desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de disociación: que relaciona la masa total de piedra caliza, su capacidad calorífica y el cambio de temperatura.

$$E_{pc} = m_{pc} * Cp_{pc} * (T_{disociación} - T_{amb})$$

- $E_{prod}$  es la energía en los productos al finalizar el proceso: que relaciona la masa total de cal producida, su capacidad calorífica y el cambio de temperatura.

$$E_{prod} = m_{prod} * Cp_{prod} * (T_{final} - T_{amb})$$

- $E_{rxn}$  es la energía consumida únicamente en la calcinación de la piedra caliza, es decir, a partir del momento en el que alcanza la temperatura de disociación: que se calcula a partir de la entalpía de reacción de la calcinación.

$$E_{rxn} = \Delta H_{reacción} = H_{prod} - H_{react}$$

$$\Delta H_{reacción} = \sum (N * \bar{h}_f^{\circ})_{prod} - \sum (N * \bar{h}_f^{\circ})_{react}$$

- $E_{conv}$ : pérdidas por convección.

Para modelar las pérdidas de calor a través de la pared, se empleará un enfoque basado en la convección natural sobre una placa vertical, como lo describe Cengel, (2015). Esto se justifica por la disposición del horno, el cual está ubicado en una ladera, permitiendo la identificación de una única pared (la frontal), ya que, debido a su geometría cilíndrica y su integración en la ladera, se asume que las demás paredes se comportan como infinitas. Adicionalmente, dado que el horno es de fabricación artesanal y carece de sistemas que favorezcan la convección forzada, el modelo simplificado se centrará en la pérdida de energía por transferencia de calor por convección natural únicamente en la pared frontal. Esta pared tiene dimensiones de 2.5 m de ancho y 5 m de altura (Çengel & Boles, 2015)

De modo que, mediante el número de Rayleigh y el número de Nusselt, se determina el coeficiente de transferencia de calor. Se integra el efecto del tiempo de operación (lote de siete días) para estimar la pérdida total.

$$E_{conv} = h_{conv} * (T_w - T_{amb})$$

- $E_{rad}$ : pérdidas por radiación.

Se aplica la Ley de Stefan-Boltzmann para estimar las pérdidas radiactivas, nuevamente considerando la integración en el tiempo del proceso.

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{ref}^4)$$

- $E_{vap}$  es la energía presente en el vapor de agua.

Se calcula considerando tanto la humedad presente en la composición del combustible como la que se forma a partir de la combustión del hidrógeno. Este cálculo relaciona la masa total de vapor generado con la entalpía de vaporización.

$$E_{vap} = m_{H_2O} * \Delta H_{vap}$$

- $E_{gases}$ : energía en forma de calor en los gases de combustión; que relaciona la masa total de gases producidos, su capacidad calorífica y el cambio de temperatura.

$$E_{gases} = \sum M_i \cdot Cp_i \times (T_{out_{gases}} - T_{ref})$$

- $E_{cenizas}$ : energía sensible en las cenizas; que relaciona la energía residual presente en las cenizas a partir la masa total de cenizas, su capacidad calorífica y el cambio de temperatura.

$$E_{cenizas} = m_{SiO_2} \cdot Cp_{SiO_2} \cdot (T_{prod} - T_{ref})$$

- $E_{unb}$ : asociado a pérdidas menores no cuantificadas explícitamente.

### 5.3.3 Balance de Exergía

El balance de exergía se plantea según la Segunda Ley de la Termodinámica, la cual permite evaluar no solo la cantidad de energía involucrada en el proceso, sino también su calidad y capacidad de realizar trabajo útil. De modo que ese estableció la ecuación general así:

$$Ex_{pc} + Ex_{fuel} + Ex_{aire} = Ex_{cal} + Ex_{gases} + Ex_{wall} + Ex_D$$

Esta ecuación representa la entrada de exergía a través de la piedra caliza, el combustible y el aire de combustión. Mientras que las salidas incluyen la exergía contenida en la cal producida, en los gases de combustión, y las pérdidas a través de la pared del horno. Finalmente, se planteó que la diferencia entre entradas y salidas corresponde a la exergía destruida, la cual es la fracción que se pierde irreversiblemente debido a las ineficiencias del proceso.

Para cada componente del balance se deben contemplar los aportes de las exergías físicas ( $Ex_{ph}$ ) y químicas ( $Ex_{ch}$ ):

$$Ex = Ex_{ch} + Ex_{ph}$$

Donde:

- Exergía de la piedra caliza: que considera la masa total de la piedra caliza y la contribución individual de cada compuesto en ella, la cual es ponderada con sus fracciones molares y sus exergías químicas estándar. Así también se relaciona el cambio de entalpía y entropía entre el estado actual y el estado de referencia.

$$Ex_{ch} = m_{pc} \times \sum \omega_i \cdot ex_i$$

$$Ex_{ph} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

- Exergía en el combustible:

$$Ex_{ph_{fuel}} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$EX_{ch_{fuel}} = \varphi \cdot PCI \cdot m_{fuel}$$

Donde el valor de  $\varphi$  para combustibles sólidos, según Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele (2013):

$$\varphi = 1.0437 + 0,1896 \cdot \frac{\omega_H}{\omega_C} + 0.0617 \cdot \frac{\omega_O}{\omega_C} + 0.0428 \cdot \frac{\omega_N}{C}$$

Donde  $\omega_i$  corresponde a la fracción molar de cada elemento en la composición del combustible. El término  $\varphi$  es un coeficiente de corrección que relaciona el PCI del combustible con su exergía química total. Este coeficiente considera la contribución de los distintos elementos presentes en el combustible (C, H, O y N) y se calcula según la correlación propuesta por Sagastume Gutiérrez et al. (2013).

- Exergía en la cal: que considera la fracción molar de cada componente químico en la cal y su exergía química estándar; así como su exergía física relacionada al cambio de entalpia y entropía respecto al estado de referencia.

$$Ex_{ph_{cal}} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$Ex_{ch} = m_{cal} \times \sum \omega_i \cdot ex_i$$

Donde  $\omega_i$  es la fracción másica de cada compuesto y  $ex_i$  la exergía química estándar de cada compuesto.

- Exergía del aire estequiométrico: que considera tanto las propiedades termodinámicas del aire al ingresar al horno, como las contribuciones químicas de cada componente del aire a la entropía de la mezcla.

$$Ex_{ph} = (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)$$

$$Ex_{ch} = N_{aire} \times \sum_k (x_k \cdot ex_k) + R \cdot T_0 \cdot \sum_k (x_k \cdot \ln|x_k|)$$

Donde:

$N_{aire}$  es la cantidad de moles de aire estequiométrico.

$x_k$  es la fracción molar en la mezcla.

$ex_k$  es la exergía química estándar de cada componente.

- Exergía en los gases de combustión: que considera tanto las propiedades termodinámicas de los gases de combustión, como las contribuciones químicas de cada componente a la entropía de la mezcla.

$$Ex_{ph} = \sum (H - H_0) - T_0 \cdot (S - S_0)_i$$

$$Ex_{ch} = N_{mezcla} \times \sum_k (x_k \cdot ex_k) + R \cdot T_0 \cdot \sum_k (x_k \cdot \ln|x_k|)$$

Donde:

$N_{aire}$  es la cantidad de moles la mezcla de gases.

$x_k$  es la fracción molar en la mezcla.

$ex_k$  es la exergía química estándar de cada componente.

- Exergía en las pérdidas en pared: que considera las pérdidas en pared tanto por transferencia de calor por convección como transferencia de calor por radiación.

$$Ex_{wall} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot Q_p$$

Donde, según Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele (2013):

$$Q_p = E_{conv} + E_{rad}$$

Finalmente, luego de encontrar los valores de la exergía de cada elemento, se reorganizó el balance de exergía, lo cual permitió determinar la cantidad de exergía destruida por irreversibilidades internas:

$$Ex_D = Ex_{fuel} + Ex_{pc} + Ex_{aire} - Ex_{cal} - Ex_{gases} - Ex_{wall}$$

### **Destrucción de Exergía:**

Las fuentes de generación de entropía y de destrucción exergética consideradas en este estudio se presentan a continuación:

- Reacciones químicas:

1. Exergía destruida por la combustión del combustible  $Ex_{D_{comb}}$ . Para este cálculo, se asume combustión completa de 1kg de combustible.

$$Ex_{D_{comb}} = T_0 \cdot S_{gen}$$

Donde:

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} + \frac{Q_{comb}}{T_{comb}}$$

$$\Delta S_{sys} = S_{prod} - S_{reac}$$

$$Q_{comb} = m_{fuel} \cdot PCI - m_{gases} \cdot Cp_{gases} \cdot T_{comb}$$

Se tiene que, según Rong (2017):

$$Cp_{gases} = \frac{1}{n} \sum_n Cp_i$$

2. Exergía destruida por la calcinación de la piedra caliza  $Ex_{D_{CaCO_3}}$ , tal y como exponen Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele (2013):

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} + \frac{Q_{rxn}}{T_{disociación}}$$

Donde:

$$\Delta S_{sys} = m_{pc} \times (S_{prod} - S_{reac})$$

Para este procedimiento, se asumirá la calcinación de 1[kg] de piedra caliza, cuyos productos únicamente serán la cal viva y dióxido de carbono.

- Transferencia de masa: exergía destruida por la difusión del dióxido de carbono

$$Ex_{D_{difusión}}$$

Según Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele (2013):

$$S_{gen} = m_{CO_2} \times \left[ Cp_{CO_2} \cdot \ln\left(\frac{T_g}{T_d}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{P_{CO_2}}{P_f}\right) \right]$$

Donde:

$$T_g - T_d = 150$$

Sabiendo que  $T_d = 1273[K]$ , entonces para este cálculo  $T_g = 1423[K]$ .

$$P_{CO_2} = \chi_{CO_2} \cdot P_{total}$$

$$P_f = 2.5 \cdot 10^{12} \cdot \exp\left(-\frac{168000}{R \cdot T_d}\right) [Pa]$$

$$R_{CO_2} = 0.1889 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \text{ (Cengel \& Boles, 2011).}$$

- Transferencia de calor y momento  $Ex_{D_{HMT}}$ :

Lo que se categoriza como HMT (*Heat and Moment Transfer*) o en español TCM (Transferencia de Calor y Momento) incluye diversas fuentes de irreversibilidad, entre ellas los gradientes de temperatura, la fricción interna en el flujo de gases, la turbulencia, y la disipación de calor sin recuperación. Todos estos mecanismos son bien conocidos por su contribución a la generación de entropía y, por ende, a la destrucción de exergía (Bejan, 1997)

$$Ex_{D_{HMT}} = Ex_D - Ex_{D_{comb}} - Ex_{D_{CaCO_3}} - Ex_{D_{difusión}}$$

### 5.3.4 Eficiencia Energética y Exergética:

#### 5.3.4.1 Eficiencia Energética:

Según Rong (2017), la eficiencia térmica del proceso es la relación entre la energía requerida para la calcinación y la energía de entrada aportada por el combustible (Rong, 2014):

$$\eta_{energética} = \frac{E_{rxn}}{E_{fuel}}$$

#### 5.3.4.2 Eficiencia Exergética:

Según Rong (2017), en el balance exergético de hornos de cal, la principal entrada corresponde a la exergía química del combustible, mientras que la salida predominante es la exergía química de la cal viva, lo que determina directamente la eficiencia exergética del proceso, tal y como exponen Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele (2013).

$$\eta_{exergética} = \frac{Ex_{cal}}{Ex_{fuel}}$$

Donde:

$Ex_{cal}$  es la Exergía total de la Cal.

$Ex_{fuel}$  es la Exergía total del combustible.

Los cálculos completos del balance de masa, energía y exergía se encuentran disponibles en el apéndice de este documento, con el fin de no extender demasiado el contenido principal.

## 6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Resultados y Análisis de las Pruebas de Laboratorio

A continuación, en la Tabla 7 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales evaluados durante este estudio y de los modelos termodinámicos de balance de energía y exergía de los hornos artesanales de eje vertical.

#### 6.1.1 Análisis de la Prueba de Caracterización (PC):

**Tabla 7.** Resultados Obtenidos Prueba de Caracterización (PC):

Humedad	Cenizas		Materia Volátil		Carbono Fijo		Poder Calorífico		Azufre	FSI
	Base Seca	20.32%	Base Seca	6.23%	Base Seca	73.45%	Base Seca	5871 cal/g		
1.07%	20.12%	6.16%	72.65%	5808 cal/g	5871 cal/g	1.40%	1.42%	0.0		

*Nota.* Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos del análisis próximo de la mezcla de coque y carbón 10:1, se puede concluir:

En el análisis de la muestra compuesta principalmente por un 90% de coque y una fracción menor de carbón, se identifican aspectos fundamentales relacionados con su caracterización fisico-química. Un punto crítico es la ausencia de datos sobre las pérdidas por secado al aire, lo que impide conocer la humedad superficial de la muestra tal como fue recibida, limitando así la posibilidad de hacer comparaciones con otras muestras o con especificaciones comerciales. Los resultados del informe se presentan en base "como se determina" y en base seca, siendo esta última la más utilizada para el análisis comparativo. El contenido de humedad residual reportado es de 1.07%, y cumple una función esencial al permitir la conversión de los demás parámetros a base seca o libre de humedad. En cuanto al contenido de cenizas, se obtuvo

un valor del 20.12%, correspondiente al residuo inorgánico generado tras la combustión completa bajo condiciones controladas, lo cual sugiere una cantidad significativa de material no combustible que puede afectar el desempeño térmico del compuesto. Por su parte, la materia volátil fue de 6.16%, un valor relativamente bajo influenciado por la fracción semiantracítica del carbón, ya que el coque por sí solo presenta valores aún menores. Esta baja proporción de volátiles implica una combustión más lenta y controlada, característica deseable en ciertos procesos industriales.

El carbono fijo, calculado mediante la fórmula:

$$\text{carbono fijo} = 100\% - (\text{humedad residual} + \text{cenizas} + \text{materia volátil})$$

Este alcanza un valor del 72.65%, reflejando el alto contenido energético y la estabilidad del coque como componente predominante. Este parámetro representa la fracción sólida del material que arde lentamente, contribuyendo al mantenimiento de altas temperaturas durante largos periodos de tiempo. Asimismo, el ensayo de poder calorífico arrojó un valor de 5808 cal/g (equivalente a 10447.41 BTU/lb), lo que indica una elevada capacidad energética de la mezcla, útil para su aplicación en procesos industriales de alto consumo térmico. En cuanto al contenido de azufre, el valor registrado fue de 1.40%, el cual tiene implicaciones relevantes tanto para el tratamiento del material como para el control de emisiones atmosféricas, dado que influye directamente en la liberación de compuestos contaminantes como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) durante la combustión. Finalmente, el índice de hinchamiento libre (FSI) fue de 0.0, lo que confirma la ausencia de capacidad aglomerante del material, coherente con su elevado contenido de coque. Este resultado indica que la muestra no es adecuada para procesos que requieren

carbones coquizables, aunque sí resulta óptima para aplicaciones donde se necesite una fuente de carbono estable y de alto rendimiento energético.

### 6.1.2 Análisis por FRX Cenizas:

Los componentes químicos principales conforman un 99.785 % del total de la muestra, en donde los elementos se encuentran expresados en forma de óxidos. Los elementos traza constituyen el 0.215 % o 2148.6 ppm restantes.

**Tabla 8.** Resultados Obtenidos FRX Cenizas

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	Ti	Na <sub>2</sub> O
%	65.242	24.692	6.562	0.811	0.806	0.462	0.460	0.446	0.304

*Nota.* Elaboración propia.

#### a. Interpretación del Resultado:

Analizando los resultados obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X de la mezcla de coque y carbón 10:1, se puede concluir:

Con un 65.242%, el SiO<sub>2</sub> es el componente principal, lo que indica una alta presencia de sílice, común en cenizas de carbón y coque. Esto puede influir en las propiedades de fusión y la reactividad de las cenizas.

La presencia significativa de óxido de aluminio 24.692%, sugiere la presencia de minerales arcillosos o arcillas, las cuales pueden introducir impurezas como metales pesados que pueden ser liberados durante la combustión, además pueden aumentar la viscosidad de las cenizas fundidas complicando su manejo en procesos industriales.

Con un 6.562%, el óxido de hierro puede influir en la reactividad del material y su comportamiento en procesos metalúrgicos. Así mismo, los óxidos de calcio (0.811%), potasio

(K<sub>2</sub>O, 0.806%), fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0.462%), magnesio (MgO, 0.460%), titanio (TiO<sub>2</sub>, 0.446%) y sodio (Na<sub>2</sub>O, 0.304%) están presentes en cantidades menores, pero aún pueden tener un impacto en las propiedades de las cenizas, como su capacidad de fusión y la formación de escorias.

### 6.1.3 *Análisis por FRX Piedra Caliza:*

Los componentes químicos principales conforman un 99.894 % del total de la muestra, en donde los elementos se encuentran expresados en forma de óxidos. Los elementos traza constituyen el 0.109 % o 1058.7 ppm restante.

**Tabla 9.** *Resultados Obtenidos FRX Piedra Caliza*

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Ti
%	83.057	12.002	2.318	1.557	0.432	0.404	0.124

*Nota.* Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X para la muestra correspondiente a piedra caliza, se puede concluir:

Al tener un alto contenido de óxido de calcio 83.057%, se puede deducir su elevado contenido de calcita (CaCO<sub>3</sub>) clasificándola como una roca caliza de buena calidad formada en un ambiente marino. Los minerales asociados son la calcita CaCO<sub>3</sub> y la dolomita CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Debido a su alta pureza en carbonato de calcio, esta roca tiene un gran potencial para aplicaciones industriales, incluyendo la producción de cal, cemento y como agregado en la construcción.

La presencia significativa de dióxido de Silicio 12.002%, sugiere la influencia de sedimentos silíceos que se pueden considerar impurezas de la roca, lo que podría indicar un ambiente marino de poca profundidad influenciado por aguas fluviales.

Los niveles de  $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$  son bajos, lo que indican la presencia de procesos de meteorización y la acumulación de minerales arcillosos, lo cual demuestra su exposición a condiciones atmosféricas durante un tiempo significativo.

#### 6.1.4 *Análisis por FRX de la Cal:*

Los componentes químicos principales conforman un 99.91 % del total de la muestra, en donde los elementos se encuentran expresados en forma de óxidos. Los elementos traza constituyen el 0.09 % o 891.1 ppm restante.

**Tabla 10.** *Resultados Obtenidos FRX de la Cal*

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
%	94.178	3.213	0.992	0.772	0.586	0.17

*Nota.* Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X para la muestra correspondiente a la cal, se puede concluir:

La cal tiene un contenido muy alto de óxido de calcio 94.178%, lo que indica su nivel de pureza y su uso adecuado para aplicaciones que requieran un material altamente reactivo. El mineral asociado es la calcita  $CaCO_3$  y la dolomita  $CaMg(CO_3)_2$ . Podría ser utilizada en procesos industriales, de construcción, minería o de tratamiento de aguas residuales.

Los niveles de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , MgO y  $K_2O$  son relativamente bajos, lo que sugiere que la cal es de alta calidad y que las impurezas no afectarán significativamente sus propiedades. Estos componentes están asociados a minerales como el cuarzo  $SiO_2$ , la hematita u otros óxidos de hierro  $Fe_2O_3$ , la dolomita  $CaMg(CO_3)_2$  y a las arcillas  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ .

## 6.2 Balance de Masa

El balance de masa en el proceso de calcinación se consideraron dos reacciones químicas: la calcinación de la piedra caliza y la combustión del coque.

Al contrastar el resultado del balance de masa ideal —que estima una producción de aproximadamente 22.42 toneladas de cal viva partir de 40 toneladas de piedra caliza— con el valor reportado por el productor, 25 toneladas, se evidencia que lo reportado por el productor excede el rendimiento estequiométrico en condiciones ideales.

Además de las impurezas y residuos comúnmente presentes en la cal viva comercial, ya discutidos anteriormente, existen otros factores que pueden explicar este exceso. Entre ellos, destaca la variabilidad de la composición del mineral calcáreo, ya que la piedra caliza no siempre presenta un contenido uniforme de carbonato de calcio, lo que puede afectar directamente su descomposición.

De la misma manera, se debe tener en cuenta que las condiciones térmicas dentro del horno no son homogéneas, lo cual es muy común en este tipo de hornos artesanales. Esto influye directamente en la cantidad de material calcinado y, en consecuencia, en la masa del producto final.

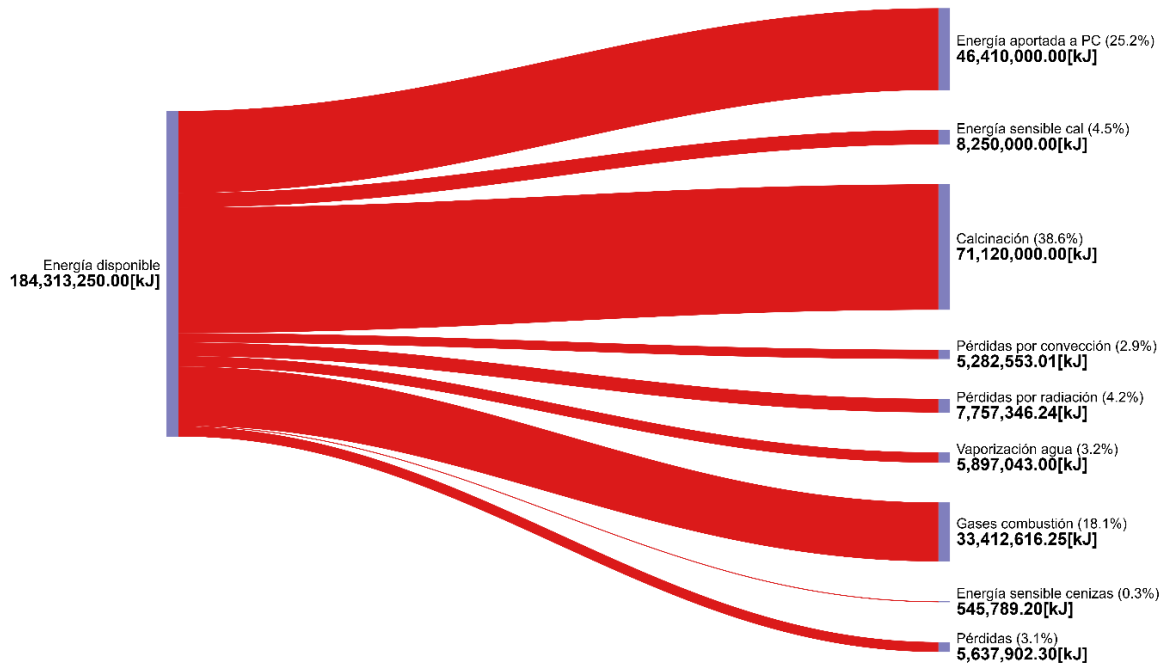
Todo este conjunto de factores, sumados a posibles errores operativos (como sobreestimaciones en los pesajes, registros poco precisos o la confusión entre la capacidad nominal del horno y su producción real por lote), contribuyen a la discrepancia observada. No obstante, estas variaciones resultan comprensibles si se considera la ausencia de controles rigurosos y la naturaleza empírica del proceso.

En el desarrollo del balance de masa de la combustión, se utilizó como base la fórmula empírica del combustible  $C_{5.93}H_{5.51}N_{0.1071}S_{0.02}$ . A partir de esta composición se realizó el sistema de ecuaciones que estableció una relación aire/combustible estequiométrica  $\alpha$  de 7.383 y un exceso de aire  $\varepsilon$  de 1.052, lo que vendría siendo un 5.2% de exceso. Los productos obtenidos incluyen 5.784 moles de  $CO_2$ , 0.1495 moles de  $CO$ , 2.755 moles de  $H_2O$ , 0.02 moles de  $SO_2$ , y 0.1071 moles de  $NO$ , junto con 0.4578 moles de oxígeno residual y 29.2 moles de  $N_2$ . Además, se arrastran impurezas no reactivas del combustible, como 0.059 moles de  $H_2O$  y 0.3349 moles de  $SiO_2$ , que no intervienen químicamente en la combustión, pero permanecen en el sistema.

En conjunto, estos resultados respaldan que la combustión no es ideal pero el balance de masa brinda un modelo claro de cómo interviene cada reactivo y producto.

### **6.3 Balance de Energía**

El balance energético realizado al horno permitió evaluar la eficiencia del proceso sobre la cual influyen las distintas interacciones de energía involucradas. Este mostró que la energía suministrada por el combustible se distribuye en diferentes salidas, cumpliendo así con el principio de la conservación de energía según la Primera Ley de la Termodinámica. A partir de estos cálculos, se logró cuantificar el aprovechamiento de la energía a lo largo del ciclo de operación del horno y sus ineficiencias durante el proceso de calcinación de la piedra caliza. Los resultados de este balance se encuentran en la Figura 30.

**Figura 30.** Diagrama Sankey del balance de energía.

*Nota.* Elaboración propia.

En la Figura 30, se observa que la totalidad de la energía suministrada, correspondiente a 184.31 GJ, proviene del combustible. Esta energía se reparte entre diversas salidas que incluyen tanto consumos útiles del proceso como pérdidas térmicas. La mayor parte de energía se destina a la etapa de calcinación, con un valor de 71.12 GJ, la cual se trata de una reacción endotérmica que requiere un suministro constante de calor para llevar a cabo la descomposición del carbonato de calcio  $CaCO_3$ . Le sigue el calentamiento de la piedra caliza, que representa 46.41 GJ, la cual corresponde a la energía necesaria para elevar su temperatura desde la temperatura de entrada (temperatura ambiente) hasta la temperatura de disociación.

El valor de 8.25 GJ representa la energía térmica que permanece en la cal viva como producto final, lo cual indica una oportunidad para recuperar parte de esta energía antes del enfriamiento y posterior descarga. Por otro lado, se identifican pérdidas asociadas a la

transferencia de calor por convección (5.28 GJ) y radiación (7.76 GJ) hacia el ambiente, lo que evidencia la falta de aislamiento térmico en la estructura del horno, especialmente en la pared frontal expuesta. Estas pérdidas podrían reducirse significativamente mediante el uso de materiales refractarios o recubrimientos térmicos adecuados.

De igual manera, se observa una pérdida considerable en los gases de combustión (33.4 GJ), que arrastran una parte importante de calor que no es aprovechado. Los gases de combustión representan una oportunidad para recuperar energía térmica mediante el uso de tecnologías complementarias, como intercambiadores de calor o sistemas de cogeneración, lo cual ha sido ampliamente documentado en la literatura (Çengel & Boles, 2015), (Bejan, 1997). Moran et al., 2014 (Moran & Shapiro 2014). También se identifican 5.9 GJ en forma de vapor de agua, asociados a la evaporación de la humedad presente en la piedra caliza y en el entorno del horno. De ser necesario, esta pérdida podría minimizarse mediante un secado previo del combustible usado.

La presencia de cenizas (0.55 GJ), aunque estas no participen en la reacción de la calcinación, indica que retienen parte de la energía en forma de calor, debido a su masa y su capacidad calorífica. Razón por la cual fueron incluidas en el balance energético.

Finalmente, la presencia de combustible no quemado (5.64 GJ) sugiere una combustión incompleta, lo cual no solo representa una pérdida energética por sí misma, sino que también puede señalar posibles deficiencias en el diseño del horno, en la distribución de las materias primas dentro del horno (construido por capas alternadas de material) o en la relación aire-combustible utilizada. Teniendo en cuenta que el horno no cuenta con un sistema de suministro

de aire, esto puede abordarse mediante una mejora en el control de las variables del proceso y la optimización del suministro de aire.

#### 6.4 Eficiencia energética

$$\eta_{energética} = \frac{E_{rxn}}{E_{fuel}}$$

Donde:

$E_{rxn}$  es la energía requerida para la calcinación de la piedra caliza.

$E_{fuel}$  es la energía total aportada por el combustible.

$$\eta_{energética} = \frac{71.12[GJ]}{184.31 [kJ]} = 0.385 \approx 39\%$$

Este valor de eficiencia energética, si bien no es óptimo, resulta razonable para un horno tradicional sin recuperación de calor, ni control de los parámetros de operación y confirma que un 61 % de la energía se pierde en forma de energía térmica no aprovechada. Es un valor de eficiencia muy baja si se compara con el valor de eficiencia obtenida en algunos trabajos anteriores de otros autores (ver Tabla 11) que también se han centrado en la calcinación de piedra caliza. Sin embargo, cabe destacar que estos estudios han analizado procesos con una etapa de precalentamiento antes de llevarse a cabo la calcinación:

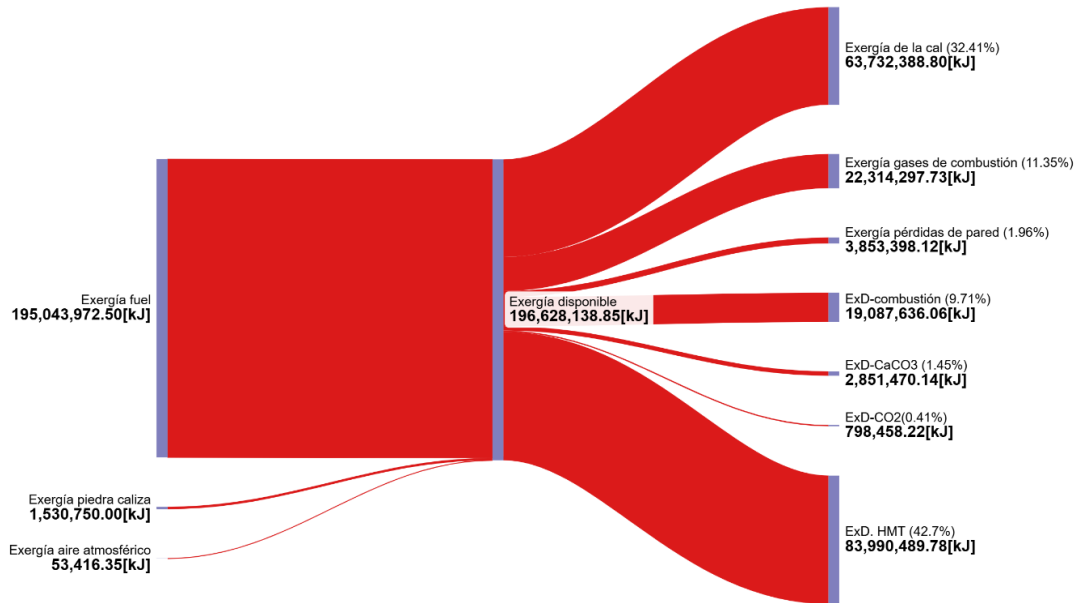
**Tabla 11.** Comparación de eficiencias con la literatura.

	<b>Este estudio</b>	<b>Gutiérrez</b>	<b>Alcántara</b>	<b>Rong</b>
Eficiencia energética	39%	56.8%	54.68%	59.8%
<i>Tipo de horno usado</i>	Eje vertical artesanal	Eje vertical con sistema de precalentamiento	Eje vertical	Eje anular con quemadores opuestos.

*Nota.* Elaboración propia

### 6.5 Balance de Exergía

El balance de exergía realizado al horno permite evaluar la eficiencia del proceso desde el enfoque de la Segunda Ley de la Termodinámica, teniendo en cuenta no solo la cantidad de energía involucrada, sino también su calidad y el grado en que puede ser aprovechada para realizar trabajo útil. Este análisis muestra cómo la exergía suministrada por el combustible se distribuye en diferentes salidas, conservándose en parte en los productos del proceso y siendo destruida en otras por irreversibilidades propias del sistema. A partir de estos cálculos, se logró identificar las principales fuentes de destrucción de exergía y cuantificar el aprovechamiento real de la energía disponible a lo largo del ciclo de operación del horno. Los resultados de este balance se encuentran en la Figura 31.

**Figura 31.** Diagrama de Exergía en un Sistema Termodinámico

*Nota.* Elaboración propia.

El diagrama de Sankey del balance de exergía muestra que la exergía total suministrada, correspondiente a 196.58 GJ, proviene casi en su totalidad del combustible (195 GJ), mientras que el resto es aportado por la piedra caliza (1.53 GJ) y el aire atmosférico (0.05 GJ).

Entre las salidas exergéticas del sistema, el valor más alto corresponde a la cal viva, con 63.74 GJ, que representa la exergía contenida en el producto principal del proceso. Esta cantidad está relacionada con el valor energético que conserva el producto final y representa una parte de la suministrada al sistema que fue aprovechada. Por otro lado, los gases de combustión y la energía transferida por pared poseen exergías de 22.32 y 3.86 GJ, respectivamente. Estos valores de exergía corresponden a pérdidas asociadas a la transferencia de calor hacia el ambiente, especialmente por radiación y convección.

El análisis también identifica las principales fuentes de destrucción de exergía, es decir, los procesos que generan entropía e irreversibilidad dentro del sistema, y que reducen significativamente la eficiencia termodinámica del horno.

Luego se encuentra la combustión, con 19.1 GJ de exergía destruida. A pesar de ser necesaria para generar el calor requerido, la combustión es considerada uno de los procesos más irreversibles en la naturaleza ya que involucra reacciones químicas, transferencia de calor a temperaturas muy diferentes y mezcla de gases (Bejan, 1997, p. 369). También se presenta destrucción por la disociación del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), con 2.86 GJ, relacionada con los cambios químicos y térmicos que ocurren al formar los productos. Finalmente, la difusión del  $\text{CO}_2$  aporta una destrucción menor (0.8 GJ), pero significativa desde el punto de vista del transporte de masa, ya que representa energía perdida al salir los gases desde el interior del material hacia el ambiente.

## 6.6 Eficiencia Exergética

$$\eta_{\text{exergética}} = \frac{Ex_{\text{cal}}}{Ex_{\text{fuel}}}$$

Donde:

$Ex_{\text{cal}}$  es la Exergía total de la Cal.

$Ex_{\text{fuel}}$  es la Exergía total del combustible.

$$\eta_{\text{exergética}} = \frac{63.7 [kJ]}{196.6 [kJ]}$$

$$\eta_{\text{exergética}} = 0.32 \approx 32\%$$

Este resultado indica que cerca del 32 % de la exergía disponible en el combustible es aprovechada en forma de cal viva, mientras que el resto se pierde debido a las irreversibilidades del proceso, como la transferencia de calor no recuperada, la fricción y mezcla en el flujo de gases, la combustión, entre otros fenómenos que generan entropía.

Este valor de eficiencia se encuentra en un rango similar al reportado por otros autores que también han evaluado la eficiencia exergética en procesos de calcinación de piedra caliza. En la Tabla 12 se comparan los resultados obtenidos:

**Tabla 12.** *Comparación Eficiencia Exergética*

	<b>Este estudio</b>	<b>Gutiérrez</b>	<b>Rong</b>
<b>Eficiencia energética</b>	33%	36.5%	35.7%

*Nota.* Elaboración propia.

Esta comparación muestra que, aunque el sistema analizado presenta limitaciones propias de un horno artesanal sin recuperación de calor ni control avanzado, su eficiencia exergética es comparable a la obtenida en estudios previos, lo cual refuerza la validez de los resultados obtenidos y permite ubicar al proceso dentro de un rango razonable de desempeño térmico según la literatura técnica disponible.

## **6.7 Análisis económico**

### **6.7.1 Costo de producción de la cal en el horno artesanal de 25 toneladas**

En entrevistas a los productores de cal del municipio pudimos recolectar la información necesaria para determinar el valor de la producción por lotes de 25 toneladas.

**Gastos de producción:**

El arriendo del horno tiene un valor de COP 350,000 por lote de producción, este rubro se tomó de esta manera porque gran cantidad de estos hornos pertenecen a personas de la tercera edad los cuales los arriendan para subsistir, para el proceso se emplean 3 viajes de piedra caliza de aproximadamente 14 toneladas cada uno el cual tiene un valor de COP 580,000. Para la carga y descarga del horno se utiliza una modalidad de contrato por labor es decir que un grupo de 3 o 4 trabajadores se reúnen para realizar esta labor, el costo de carga es de COP 480,000 y consiste en preparar la piedra caliza para ingresar al horno, realizar el llenado del horno con la materia prima y el combustible, hacer el sellado del horno en la parte superior y finalmente iniciar el fuego para iniciar el proceso de cocción de la cal. El valor de la descarga es de COP 480,000 consiste en retirar la materia ya calcinada del horno, hacer limpieza necesaria y por ultimo dejar la cal viva lista para el siguiente proceso, dicho proceso varía según los requerimientos del cliente. En esta labor se da alimentación e hidratación a los obreros, onces, almuerzo y cerveza estos gastos son de COP 300,000. El valor del combustible empleado es de COP 4,330,000.

**Tabla 13.** *Gastos Producción de 25 Toneladas*

<b>Concepto</b>	<b>Costo</b>
Arriendo del horno	COP 350,000
40 Toneladas de piedra caliza	COP 1,750,000
7 Toneladas coque	COP 4,200,000
0.5 Toneladas de carbón	COP 130,000
Carga del horno	COP 480,000
Descarga del horno	COP 480,000
Alimentación e hidratación	COP 300,000
<b>Total</b>	<b>COP 7,690,000</b>

*Nota.* Elaboración propia.

Costo de la cal por tonelada = **COP 7,690,000** ÷ **25 Ton** = **COP 307,600**

Valor de venta por tonelada = **COP 400,000** (Cal viva)

### **6.7.2 Costo real de la energía útil aprovechada**

*Costo energético total* = **COP 4,330,000**

*Aprovechamiento útil* = **33%**

*Costo asociado a la exergía útil* = **COP 4'330.000** × **0.33** = **COP 1'428.900**

Lo cual implica que sólo **COP 1'428.900** del total realmente aportan al proceso útilmente.

### **6.7.3 Pérdidas económicas por ineficiencia**

*Pérdida económica* = **4'330.000** – **1'428.900** = **2'901.100**

Este monto representa dinero gastado en calor perdido por irreversibilidades en el sistema. Por ejemplo, fugas, control del aire ineficiente, elevadas tasas de transferencia de calor, entre otras.

## 7 CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto de grado permitió realizar un análisis del comportamiento energético y exergético de hornos artesanales de eje vertical con capacidades de 25 toneladas para la producción de cal en el municipio de Nobsa, Boyacá.

La recolección de datos clave como dimensiones, temperaturas de trabajo y flujos de material permitió tener una visión clara del funcionamiento actual del horno. Se evidenció que el proceso presenta varias limitaciones que afectan su eficiencia global.

Los resultados obtenidos de la caracterización de la piedra caliza, el combustible y la cal, nos permitieron identificar que existe un elevado contenido de impurezas en la piedra caliza (16.943 %), lo cual reduce la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  disponible para la calcinación y genera un gasto de energía mayor al necesario. Además, se observó que la combustión del coque no es completa, probablemente por la falta de suficiente aire atmosférico y por la forma en que se distribuyen los materiales en el interior, en capas de coque y caliza que no favorecen una transferencia uniforme del calor.

El balance de masa mostró discrepancias en las cantidades ideales y reales de cal producidas, lo cual respalda la necesidad de considerar, en este tipo de sistemas y procesos, no sólo las limitaciones técnicas asociadas al control de variables como la temperatura, la composición de las materias primas o precisión de los registros, sino también los aspectos logísticos y prácticos bajo los cuales se llevan a cabo estos procesos industriales no automatizados que influyen en la forma en la que se cuantifica el rendimiento del proceso.

Los análisis energéticos y exergético mostraron pérdidas térmicas considerables a través de la pared frontal del horno, donde no hay aislamiento ni sistemas para recuperar el calor

perdido. Estas condiciones explican las eficiencias relativamente bajas obtenidas: aproximadamente 39 % en términos energéticos y 33 % en cuanto a exergía. Aun así, el estudio permite identificar oportunidades de mejora importantes, como ajustar el exceso de aire, revisar la relación caliza/combustible y considerar la implementación de tecnologías para recuperar energía.

Finalmente, si se busca avanzar hacia una caracterización más precisa del proceso, es clave contar con sistemas que permitan un control más riguroso de las condiciones internas, especialmente para medir temperaturas. También sería valioso contar con un análisis de los gases de combustión el cual habría sido un aporte significativo para enriquecer el análisis exergético.

### Referencias Bibliográficas

- Abuhayar, C. (2016). Mejoras en el proceso productivo de una fábrica de transformación de  
Agencia Nacional de Minería. *Agencia Nacional de Minería*, 10-14.
- AGT Mining. (2015). Factores que afectan la calidad de la cal viva. *Calidad Respiratoria*, 8-12.
- Alcantara, J. (2009). a producción de cal en hornos de cuba: Experiencia en Antillana de Acero.  
Unidad Docente Metalúrgica. *Scielo*, 12-16.
- Ballesteros, D. (23 de Julio de 2014). *Estudio y análisis de la utilización de la cal en Argos* .
- Bejan, H. (1997). *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley. (2nd ed.).
- Boynton, R. (1980). *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. Wiley, 8-11.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica* (7ª ed.). McGraw-Hill.
- Çengel, Y., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica: Un enfoque práctico*. McGraw-Hill  
*Education*. (8.ª ed.).
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.).  
McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications* (5th ed.). McGraw  
Hill.
- DANE. (15 de Abril de 2020). *Encuesta Mensual Manufacturera con Enfoque Territorial*  
(EMMET). Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- DANE. (12 de junio de 2022). *Informe de gestión 2021-2022*. Obtenido de Departamento  
Administrativo Nacional de Estadística: <https://www.dane.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/transparencia/informes-de-gestion-evaluacion-y-auditoria/informes-de-gestion-dane-fondane-por-vigencia-al-congreso-de-la-republica>

- DANE. (10 de Diciembre de 2024). *Índice de Producción Industrial (IPI): Resultados diciembre de 2024*. Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística:  
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/indice-de-produccion-industrial-ipi>
- Datawheel, R. (15 de Diciembre de 2021). *The Observatory of Economic Complexity (OEC)*.
- Echeverria, J. (13 de Mayo de 2014). *Redimensionamiento de las cámaras de combustión del horno de cuba de piedra caliza* . Obtenido de Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- European Lime Association. (18 de Junio de 2023). *La cal: Sumidero natural de carbono*. Obtenido de <https://eula.eu/wp-content/uploads/2023/11/LA-CAL-SUMIDERO-NATURAL-DE-CARBONO.pdf>
- Fajardy, M., & Pour, F. (2012). Bioenergy with Carbon Capture and Storage. *Redalyc*, 14-16.
- Fernandez, D. (12 de Agosto de 2018). *Criterios para la utilización de la cal en la conservación del patrimonio* .
- Fundación Entorno. (2000). Guía tecnológica: Fabricación de cal y derivados. Ministerio de Medio Ambiente de España. *Redalyc*, 11-14.
- Garcia, B., & Marin, J. (2019). Sal y salinas en las provincias hispanas: Formas de producción, implantación territorial e impacto ambiental en el contexto del Imperio romano. *De Re Rustica*, 429-554.
- Glassman, I., & Yetter, R. (2008). *Combustion* . *Academic Press*.
- Gutierrez, A., & Martinez, D. (2019). Balance de Energía y Energía de un Horno de Cuba Vertical. *Scielo*, 4-7.

- Higuera, F., & Lopez, M. (2011). Estudio del proceso de calcinación en Nobsa Boyaca y uso de la cal en los procesos sidero-metalúrgicos y en la construcción. *Redalyc*, 08-10.
- Hill, N., & Mason, K. (1997). How to calculate the energy efficiency of your Lime burning process. *Scientist*, 14-19.
- Iroldi, M., & Collazo, C. (16 de agosto de 2011). *Proceso de producción de cal*.
- Jimenez, D., Lopez, C., & Montaña, D. (8 de Julio de 2011). *Origen de componentes del combustible para la empresa Cycusa*.
- Lopez, F., & Tapias, R. (2020). Balance de energía y energía de un horno de cuba vertical para la producción de cal. *International Journal of Management Science and Operations Research (IJMSOR)*, 2-3.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (12 de abril de 2018). *Programa Colombia Carbono Neutral*. Obtenido de <https://carbononeutral.minambiente.gov.co/>
- Muñoz, J., & Mondoñeda, S. (10 de octubre de 2020). *El proyecto 'Chokaa' de elaboración tradicional de cal en Turkana (Kenia): Resultados positivos siete años después (2013–2020)*. Obtenido de *Tierra y Tecnología*, (60).
- Oates, J. (1998). *Lime and limestone: Chemistry and technology, production and uses*. Wiley-VCH.
- Peray, M. (1986). *The Rotary Cement Kiln*. Chemical Publishing Company.
- Ramayo, L. (18 de mayo de 2018). *Eucalyptus x urograndis biomass production for energy purposes exposed to a Mediterranean climate under different irrigation and fertilization regimes*. *Biomass and Bioenergy*.
- Rong, W. (2014). Energy and exergy analysis of an annular shaft kiln with opposite burners. *Energy*.

- Rosell, A. (13 de Abril de 2013). *Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y formas de las partículas y su viscosidad*.  
Obtenido de <http://hdl.handle.net/10803/128414>
- Sagastume Gutiérrez, A., Cogollos Martínez, J. B., & Vandecasteele, C. (2013). Energy and exergy assessments of a lime shaft kiln. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 288–295.
- Sanchez, L. (12 de abril de 2019). *Manual de estabilización de suelos con cal*.
- Tovar, J., Sanguino, O., & Baztan, J. (20 de diciembre de 2014). *La producción de cal en el medio rural de Hispania. De Re Rustica: Arqueología de las actividades económicas en los campos de Hispania*. Obtenido de  
[https://www.academia.edu/113276046/La\\_producci%C3%B3n\\_de\\_cal\\_en\\_el\\_medio\\_rural\\_de\\_Hispania](https://www.academia.edu/113276046/La_producci%C3%B3n_de_cal_en_el_medio_rural_de_Hispania)
- Troya, M. (10 de Septiembre de 2017). *La cal de morón: un ejemplo de supervivencia de una actividad tradicional*. Obtenido de Scielo.
- Van, W., & Sonntag, B. (1994). *Fundamentals of Classical Thermodynamics. Wiley-4th ed.*
- Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., & Borgnakke, C. (1994). *Fundamentals of Classical Thermodynamics (4th ed.)*. Wiley