

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero en Procesos Agroindustriales**

**Título: Determinación de óxido de calcio en la planta de cal de “Urbano Noris”**

**Autor: Leonid Cordovi Alarcón**

**Tutor: MSc. Artemio Hernández de Armas**

**Holguín, 2022**

## **Dedicatoria**

A ti Dios que me diste la oportunidad de vivir y darme el gran progreso.

Con mucho cariño principalmente a mi madre y esposa e hija por su apoyo y confianza depositada en mí, por motivarme, enseñar valores elementales que me ayudo crecer.

Gracias a esas personas importantes en mi vida, que siempre han estado listos para ayudarme incondicionalmente.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa Yiliannis y a mis hermanos José Ángel, Lisvan, Leandro y Luis Mario por su apoyo durante mi carrera.

A mi tutor MSc.Artemio Hernández de Armas por sus enseñanzas y guiarme durante la realización de esta investigación.

A mis compañeros y profesores que juntos, estos 5 años de carrera, hemos logrado llegar hasta cumplir la meta.

A todos los que de una forma u otra contribuyeron a mi formación como profesional.

Gracias...

Leonid

## RESUMEN

La presente investigación se centra en la revisión de los procesos de mejora de la calidad del óxido de calcio (CaO) aprovechable, para la fabricación de azúcar en las Empresas Agroindustriales Azucareras. Se le realizó un estudio a las variables que pueden influir en la calidad de la cal, estando determinada por la granulometría, concentración de carbonato de calcio, residencia en el horno y la temperatura de calcinación. Se identificaron las oportunidades de mejora con el fin de lograr un aumento de la calidad de la cal; así como se realizaron 64 pruebas experimentales, considerando las 4 variables en sus diferentes valores. Se evaluaron las concentraciones de CaCO<sub>3</sub> de 94,38 % y 99,52 %, las que reportaron mejores valores de conversión; así con la caliza de 99,52 % de carbonato de calcio se logró obtener hasta 90,89 % de CaO disponible y con la de 94,38 % hasta 89,85 % de CaO disponible. Los valores de las variables que permitió obtener mayor rendimiento en la obtención de cal viva fueron la granulometría de piedra caliza siendo de 60 milímetros, la concentración de carbonato de calcio de 99,52 %, el tiempo de residencia de 8 horas y la temperatura de calcinación de 1000°C.

## **ABSTRAC**

This research focuses on reviewing the processes for improving the quality of calcium oxide (CaO) usable for the manufacture of sugar in Agroindustrial Sugar Companies. A study was carried out on the variables that can influence the quality of the lime, being determined by the granulometry, calcium carbonate concentration, residence in the oven and the calcination temperature. Opportunities for improvement were identified in order to achieve an increase in lime quality; as well as 64 experimental tests were carried out, considering the 4 variables in their different values. CaCO<sub>3</sub> concentrations of 94.38% and 99.52% were evaluated, which reported better conversion values; Thus, with the limestone containing 99.52% calcium carbonate, it was possible to obtain up to 90.89% of available CaO and with the 94.38%, up to 89.85% of available CaO. The values of the variables that allowed obtaining the highest yield in obtaining quicklime were the granulometry of limestone being 60 millimeters, the concentration of calcium carbonate of 99.52%, the residence time of 8 hours and the temperature of calcination of 1000°C.

## ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Generalidades del Proceso de la Obtención de la Cal.....	4
2.2 Características de la piedra Caliza.....	8
2.3 Clasificación de calizas según el contenido de carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> ).....	9
2.4 Oxido de Cal (Cal Viva).....	10
2.5 Tipos de cal.....	10
2.6 Usos y Aplicaciones de la cal viva.....	11
2.7 Procesamiento de la cal.....	11
2.8 Generalidades de la cal en el proceso de obtención del azúcar.....	13
3. Materiales y Métodos.....	16
4. Resultados y Discusiones.....	24
5. Conclusiones.....	30
6. Recomendaciones.....	31
7. Bibliografías	
8. Anexos	

## I. INTRODUCCIÓN

La cal es el más antiguo, vivo y actual de los productos químicos de origen natural. Al parecer, la cal viva (óxido de calcio) fue descubierta casualmente cuando se realizaban fogatas sobre rocas calcáreas, las que luego se apagaban con agua, pudiendo observar que, en operaciones sucesivas, las rocas iban sufriendo cambios hasta desintegrarse (transformación a cal apagada). Luego sucedía que la roca se transformaba en una pasta, dejándose moldear y con el tiempo se secaba adquiriendo dureza, lo que permitió pegar piedras para fabricar, de este modo la cal se empleó en la edificación de obras conocidas a nivel mundial, las cuales sorprenden por su resistencia al paso del tiempo (Castillo, 2016).

Los empleos de la cal han aumentado y cambiado con el pasar del tiempo, se usó en un principio en la construcción y en la agricultura; como por ejemplo las Pirámides de Egipto y el Coliseo, hoy en día, expertos en diversas industrias han podido constatar que no existe un material sustituto de la cal que brinde tantos beneficios a costos tan bajos (ANCADE, 2015).

En la actualidad, la obtención de la cal comienza cuando se encuentra una cantera de roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) se extrae, se tritura, se calcina para obtener (CaO) cal viva y en algunos casos se hidrata para obtener cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Dependiendo del uso, se demandan características diferentes de la caliza para satisfacer necesidades en las diferentes esferas del quehacer humano (Tlaloc, 2013).

(Otero, 2016) plantea que la cal es uno de los productos más versátiles por su empleo en diferentes sectores, un gran porcentaje de los procesos químicos e industriales utilizan la cal como un reactivo industrial basificante, purificante de metales, absorbente, neutralizante, coagulante o acondicionante.

De igual forma el uso de la cal comprende la construcción, la siderurgia, que es su mayor consumidor, metalurgia no ferrosa, papel, fertilizantes, alimentación, vidrio, acuicultura, recubrimientos, protección ambiental tanto atmosférica como depuración de aguas, en el mercado de terrenos de béisbol y en la industria azucarera.

(Leyva, Mayo y Hylton, 2016) señalan que, en Cuba inicialmente se usaba la cal solo para la construcción, siendo ejemplos emblemáticos el acueducto de Albear y el famoso puente de cinco arcadas sobre el río Yayabo que atraviesa la ciudad Espirituana. Es una de las joyas arquitectónicas más antiguas de su tipo en Cuba se comenzó a construir en 1817 y se terminó en 1831, se levantó a partir de ladrillos, cal y arena de la zona. Señalan que

con el desarrollo de la industria azucarera la producción de cal alcanza un gran auge , constituyendo este el motivo fundamental por el cual comenzó a explotarse la calera de San Germán en el actual municipio Urbano Noris hacia principios de los años 20 del siglo pasado, en el transcurso de los años se fueron modernizando su sistema tecnológico hasta alcanzar niveles productivos superiores a 750 toneladas mensuales, en la actualidad es la encargada de abastecer las demandas de los centrales azucareros de la región oriental del país.

Estos mismos autores plantean que, en la elaboración de azúcar crudo interviene el proceso de extracción del jugo de la caña este se combina con agua aplicada en él, obteniéndose el jugo mezclado, que es el que entra al proceso de fabricación, este contiene un pH ácido entre 4.8-5.5. Con el objetivo de minimizar las pérdidas por inversión del disacárido sacarosa este jugo se alcaliza hasta valores que logren un jugo clarificado de pH cercano a la neutralidad además de lograr la cantidad de calcio necesaria para la verificación de la principal reacción que ocurre en el proceso de clarificación, el que reacciona con el fósforo contenido en él, formando compuestos orgánicos que se eliminan como impurezas, para ello se utilizan unos 1000 grs de cal hidratada de 65 % de pureza como mínimo, por toneladas de caña molida.

El óxido de calcio (CaO) es el término químico utilizado para definir la calidad de cualquier tipo de hidrato de cal. En una medida del contenido (CaO) en el hidróxido comercial, basado en la relación estequiometría con el hidrato. Las secuelas de su baja calidad puede ocasionar serios problemas al ingenio azucarero, el exceso de arena, huesos y otros materiales insolubles aceleran definitivamente el desgaste de equipos y son causantes de taponamientos en las tuberías, las impurezas presentes como los óxidos de silicio (SiO<sub>2</sub>) y de magnesio (MgO) son productoras de incrustaciones en evaporadores y además retardan la reacción de floculación, La demanda de cal física se incrementa según decrece la calidad del hidrato que consumimos y en consecuencia, mayor será el volumen de agua e impurezas que ingresan al proceso (Ermount, Alfred y Meillet , 1959-1960).

Ante la aparición de problemas asociados a los bajos por cientos del óxido de calcio (CaO) en la planta de cal de urbanos Noris, malos resultados productivos, excesivo gasto energético y los altos porcentajes de los residuos es necesario realizar un estudio para determinar la causa de estos resultados.

Teniendo en cuenta lo anteriormente señalado, se propone como **problema**: Insatisfacción de las Empresas Agroindustriales Azucarera de Holguín por el bajo

porcentaje de óxido de calcio (CaO) aprovechable para el proceso de obtención de azúcar.

Para lo cual se valida la siguiente **hipótesis**: Si se conoce el porcentaje adecuado de óxido de calcio (CaO) aprovechable en la Calera de "Urbano Noris"; entonces se garantizará mejor calidad en el proceso de obtención de azúcar en las Empresas Agroindustriales Azucarera de Holguín.

**Objetivo general:** Evaluar el proceso de calcinación del carbonato de calcio en la en la planta de "Urbanos Noris" perteneciente a La Empresa de Servicios Técnicos Industriales, Sucursal Holguín.

**Objetivos específicos:**

- Determinación del porcentaje de concentración del carbonato de calcio en la piedra caliza.
- Determinar los valores óptimos de calidad de la granulometría de piedra caliza, el tiempo de residencia y temperatura de calcinación.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Generalidades y proceso de la obtención de la cal

La cal es uno de los materiales más utilizados y antiguos que se conocen teniéndose registros de su utilización en civilizaciones antiguas como la romana y egipcia. Típicamente lo que se conoce como “Cal” no es más que el producto que deriva de la calcinación de las piedras calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) justamente derivando de estas piedras su nombre. Realmente el término “Cal” puede hacer referencia a la cal misma (óxido cálcio) o a los diversos derivados de la cal, como la cal apagada por citar un ejemplo (Spiropoulos, 2015).

Este mismo autor refiere que como se mencionó anteriormente, la materia prima de la cal es la caliza. La piedra caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente de carbonato de calcio y magnesio. Esta roca se forma por la precipitación de componentes orgánicos (esqueletos y plantas) o por la deposición de fragmentos de otras piedras en las orillas de mares y lagos. Es por esta misma razón es que la composición de las piedras calizas es muy variada alrededor del mundo.

La caliza es una roca carbonatada cuyo valor mineralógico es extremadamente grande hoy en día. Una de las razones por la cual es tan valioso este mineral, es que constituye la principal materia prima para la elaboración de materiales de construcciones, tales como el cemento y el óxido de calcio (Cal viva). Este mineral ha sido muy empleado a lo largo de la historia, debido a que representa uno de los minerales más comunes sobre la superficie de la tierra. Se calcula que alrededor del 10% de la superficie de la tierra está compuesta por caliza o rocas de similar composición (Otero, 2016).

Además, existen diferentes tipos de clasificaciones para las rocas carbonatadas, entre las cuales se pueden mencionar: clasificación geológica, clasificación en base a composición elemental y clasificación en base a tamaño de grano en la matriz de la roca carbonatada. Este último tipo de clasificación es más de interés petrográfico.

La clasificación geológica de las rocas calizas está en función de la ocurrencia geológica y mineralógica. Es por ello que pueden clasificar como unas rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas (Harrison, 2016).

Este mismo autor plantea que la caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por Carbonato de Calcio en forma del mineral llamado calcita. La calcita comúnmente se forma en aguas dulces y marinas. Su proceso de formación orgánico, es el resultado de la sedimentación de conchas, corales y algas marinas. De igual manera la roca sedimentaria puede ser resultado de la precipitación de carbonato de calcio de aguas de marinas o de lagos.

De igual forma hoy en día existen muchos ambientes de formación de la roca caliza. Muchos de estos ambientes están ubicados en áreas comprendidas entre 30 grados latitud norte y 30 grados latitud sur. Por lo tanto, las áreas más comunes de formación de roca caliza son el caribe, Centro América, México entre otros. La roca caliza, como se mencionó anteriormente está constituida principalmente por Carbonato de calcio (en al menos 50 % en peso), pudiendo contener porcentajes pequeños de otros minerales. Entre los minerales asociados a la roca caliza se encuentran: el cuarzo, feldespato, pirita, entre otros. Dependiendo de la cantidad de Carbonato de calcio presente en la roca caliza esta puede clasificarse de diferente manera (Harrison, 2016).

Verplanck (2017), plantea que las más común de las rocas ígneas carbonatadas es la carbonatita, que está compuesta principalmente de carbonatos de Calcio, Magnesio y Hierro. Estos generalmente se encuentran como anillos alcalinos intrusivos en áreas que poseen antiguos asentamientos o en áreas volcánicas. Según la definición de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas una carbonatita es un sistema de rocas ígneas que presentan más del 50% de minerales carbonatados, como la calcita y dolomita y menos de un 20% de dióxido de silicio. Además, dentro de esta clasificación se encuentran todas aquellas calizas o dolomitas que han sido producto de re cristalización vía metamorfismo. La palabra metamorfismo proviene del griego meta, que significa cambio y morph, que significa forma, lo que quiere decir que una roca metamórfica es el resultado de un cambio de forma. Este cambio referido de forma en la roca es el producto del sometimiento de dicha roca a presiones y temperaturas diferentes de su origen mismo. A la roca que sufrirá el proceso de metamorfismo se le llama protolito.

Por otro lado, Nelson (2015), considera que para que pueda ocurrir el metamorfismo se deben de tener como mínimo temperaturas superiores a los 900 C. El proceso de “enterramiento de la roca carbonatada” toma lugar, gracias a procesos tectónicos, como las colisiones continentales. Durante el metamorfismo el protolito sufre cambios tanto superficiales como mineralógicos (estructura). Estos cambios tienen lugar mayoritariamente en estado sólido y son causados por las diferentes condiciones físicas y

químicas de su entorno.

La principal roca carbonatada metamórfica que se puede encontrar es el mármol. Cuando ocurre metamorfismo en una roca caliza, todo componente original (fósiles animales o vegetales), son completamente destruidos. Las rocas carbonatadas pueden presentar una gran diversidad de componentes químicos derivados de la presencia de una variedad bastante amplia de minerales encontrados en su estructura química. Los principales minerales empleados en la industria son la calcita y la dolomita (Stephen, 2015).

La calcita y la dolomita representan los dos tipos de rocas carbonatadas más utilizados en la industria de fabricación de materiales para la construcción en la actualidad. La roca caliza (como se mencionó con anterioridad) es una roca sedimentaria compuesta principalmente por el mineral llamado calcita. La calcita es Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) con una estructura cristalina Hexagonal. Por otra parte, las dolomitas son también rocas sedimentarias compuestas por el mineral dolomita. Este mineral químicamente es Carbonato de Calcio unido a Carbonato de Magnesio ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), en una estructura cristalina Hexagonal (Freas y Hayden, 2015).

De la misma forma estos autores plantean que otro mineral importante encontrado en las rocas carbonatadas es la Aragonita la cual, químicamente también es Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), pero se diferencia químicamente de la calcita, por presentar una estructura cristalina diferente (Ortorrómbica). La Aragonita es meta estable y tiene la capacidad de alternar con la calcita con el paso del tiempo.

### Piedras calizas

Las calizas son rocas sedimentarias formadas por depósito de los productos de alteración química y física de rocas preexistentes y primitivas; reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico. Debido a la extrema lentitud con la que se descomponen los fósiles que contienen carbonato de calcio y al efecto disolvente del dióxido de carbono, se forma bicarbonato de calcio. Este compuesto aparece finalmente a manera de plataformas re-carbonatadas. Capa sobre capa, estos sedimentos conforman los enormes depósitos de caliza existentes (Harrison, 2016).

### Origen hídrico

Según Freas y Hayden (2015), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se disuelve con mucha facilidad en aguas que contienen dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) gaseoso disuelto, debido a que reacciona con este y agua para formar bicarbonato de calcio [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ], compuesto intermedio de alta solubilidad. Sin embargo, en entornos en el que el  $\text{CO}_2$

disuelto se libera bruscamente a la atmósfera, se produce la reacción inversa aumentando la concentración de carbonato de calcio, cuyo exceso sobre el nivel de saturación precipita. De acuerdo a lo descrito, el equilibrio químico en solución sigue la siguiente ecuación:



De igual manera estos autores plantean que esa liberación de  $\text{CO}_2$  se produce, fundamentalmente, en dos tipos de entornos: en el litoral cuando llegan a la superficie aguas cargadas de  $\text{CO}_2$  y, sobre los continentes, cuando las aguas subterráneas alcanzan la superficie. Este es el proceso fundamental de formación de grutas y cuevas con presencia de estalactitas y estalagmitas en muchas regiones calcáreas con piedras calizas denominadas también carsos.

### Origen biológico

Numerosos organismos utilizan el carbonato de calcio para construir su esqueleto mineral, debido a que se trata de un compuesto abundante y muchas veces casi a saturación en las aguas superficiales de los océanos y lagos (siendo, por ello, relativamente fácil inducir su precipitación). Tras la muerte de esos organismos, se produce en muchos entornos la acumulación de esos restos minerales en cantidades tales que llegan a constituir sedimentos que son el origen de la gran mayoría de las calizas existentes (Otero, 2016).

### Composición química

De la misma forma Verplanck (2017), debido a que la piedra caliza es una roca sedimentaria, las calizas están compuestas de varios minerales diferentes. Todas las calizas se componen principalmente de carbonato de calcio, que es uno de los minerales más abundantes en el planeta. El carbonato de calcio constituye al menos el 50% de todas las piedras calizas en forma de calcita. Algunas calizas son calcita casi puro, pero la mayoría de calizas contienen arena y otras sustancias tales como cuarzo, piritita y minerales de arcilla. La piedra caliza es el resultado del peso de las capas de diferentes minerales de calcita y se combina con la reacción química creado por calor y presión. La caliza está formada de una serie de compuestos químicos, en el que la presencia de los carbonatos de calcio y de magnesio es más significativa. Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

### Impurezas

Destaca Verplanck (2017), que las impurezas en la caliza se clasifican como impurezas homogéneas y heterogéneas sílice y arcilla. Impurezas homogéneas como barro, lodo, arena y otras formas de sílice, como cuarzo, se distribuyen finamente en la caliza durante

su formación. En las impurezas heterogéneas aparecen, por ejemplo, fragmentos silíceos ó nódulos de arena, sílex córneo ó pedernal, se engloban también de forma incoherente en la caliza. Dependiendo del contenido en arcilla las calizas se clasifican en ordinarias (%  $\text{CaCO}_3$  >95%), arcillosas (% arcilla <10%), margosas (% arcilla 10-25%) y margas (% arcilla 25-50%).

Este mismo autor plantea que la impureza que aparece en tercer lugar de frecuencia está distribuida homogéneamente, una vez que la caliza ha comenzado a formar carbonato férrico como consecuencia de la sustitución química del calcio por el hierro. El hierro aparece repartido heterogéneamente en forma de sulfuro de hierro u óxido ferroso en minerales como piritita, limonita ó hematita.

## **2.2 Características de la piedra Caliza**

### Color

La piedra caliza es toda blanca o grisácea en color, pero puede variar de gris a marrón y también amarillo. Las rayas grises y negras que se encuentran en el material son manchas causadas por la materia orgánica. Las amarillas y marrones son en su mayoría causados por las impurezas de óxido de hierro presentes en la roca (Otero, 2016).

Este mismo autor plantea que la textura de la piedra caliza varía desde material grueso hasta partículas muy finas. Los fragmentos fósiles, los fragmentos de conchas viejas y otros materiales fosilizados forman una gran parte de su composición. A veces, estos fragmentos fosilizados se pueden ver fácilmente a simple vista. Otras veces, el material es tan fino y cristalizado que los restos fósiles no pueden ser identificados.

La piedra caliza es blanda y se raya con facilidad. En el exterior, el viento, la lluvia y los contaminantes atmosféricos se combinan para desgastar esta piedra, provocando su disolución durante largos períodos de tiempo. La roca reacciona fácilmente con los ácidos más comunes, tales como el vinagre o ácido clorhídrico. Cuando se aplica ácido, la piedra caliza presenta una intensa efervescencia. Los ácidos que se producen naturalmente en el ambiente atraviesan la piedra caliza a medida que el agua subterránea se abre camino a través de la roca (Otero, 2016).

### Porosidad

La porosidad de las partículas de caliza varía considerablemente y depende de su grado de compactación y de su estructura. Se define como la relación existente entre el volumen de los poros  $V_v$  y el volumen total  $V_{tot}$ . El volumen de poros  $V_v$  incluye tanto los poros accesibles como los no accesibles.



detalladas pueden requerir la determinación de la composición individual de los componentes del carbonato y/o minerales asociados, usando instrumentos electrónicos como el microscopio (Otero, 2016).

## **2.4 Oxido de Calcio (Cal)**

La cal se puede obtener normalmente por descomposición térmica de materiales como la piedra caliza, que contiene carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), material extraído de depósitos sedimentarios llamados caliches. Se somete a temperaturas muy altas, que oscilan entre 900 y 1000 °C, en un horno. El proceso, llamado calcinación, libera una molécula de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), resultando el material llamado óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), de color blanco y muy cáustico (quema los tejidos orgánicos) normalmente contiene también óxido de magnesio, óxido de silicio y pequeñas cantidades de óxidos de aluminio y hierro. Sin embargo, el proceso puede ser reversible, ya que, al enfriarse la cal, comienza a absorber nuevamente el  $\text{CO}_2$  del aire, y después de un tiempo, vuelve a convertirse en  $\text{CaCO}_3$  o carbonato de calcio (Castillo, 2016).

La cal viva de alto calcio es la que general y mayoritariamente se produce en nuestro país. Es un producto muy higroscópico. De hecho, tiende a absorber el vapor de agua presente en el ambiente si no es almacenada cuidadosamente. La cal viva puede ser combinada con agua, produciéndose una reacción violenta que desprende mucho calor. Se forma entonces el hidróxido de calcio que se comercializa en forma de polvo blanco conocido como cal muerta o apagada (Mohamad y Chemco, 2014).

## **2.5 Tipos de cal**

Cal Viva Se obtiene de la calcinación de la caliza que, al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique en la construcción (Pérez, 2016).

Cal hidratada obtenido en la calcinación de la caliza reacciona inmediatamente con el agua, transformándose en hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Este fenómeno se conoce como hidratación o apagado de la cal viva ( $\text{CaO}$ ) (Editorial de los Oficios de León. Guía Práctica de la Cal y el estuco, 2015).

Cal hidráulica compuesta principalmente de hidróxido de calcio, sílica ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua (Pérez, 2016).

## **2.6 Usos y Aplicaciones de la cal viva**

La cal es un material que tiene un campo muy variado de aplicación debido a sus múltiples usos, los más importantes se dan en el ámbito de la construcción, la agricultura y otros. A continuación, se mencionan los aspectos más importantes de cada uno:

Aplicación en la construcción: Uno de los usos típicos está en la fabricación de morteros que no es más que la unión de la cal con agua y algún árido. El mortero tiene como función principal la unión de elementos pequeños, en la construcción de obras. También se puede utilizar como revestimiento en paredes, muros o morteros en donde adquiere el nombre de revoco (Otero, 2016).

Aplicación en la agricultura: La cal es utilizada en la agricultura para neutralizar la acidez del mismo y promover la adición de fertilizantes (Spiropoulos, 2015).

Otros usos variados de la cal: Existen otras aplicaciones menores para la cual dentro de las cuales se puede mencionar: fundente en la industria de refinado del acero, purificación de agua, neutralización de aguas ácidas de desecho, producción de papel, producción metalúrgica, refinerías, construcción de ladrillos (Spiropoulos, 2015).

## **2.7 Procesamiento de la cal**

El proceso de producción de cal consta de una serie de etapas que comienzan desde la extracción de las materias primas hasta el almacenaje y empaque de los diversos productos derivados de la piedra caliza. Se brindan a continuación un resumen de las principales etapas:

Elección y extracción de materias primas: Como bien es sabido la materia prima de la cal, tanto viva como hidratada es la piedra caliza. Esta piedra es tomada de canteras seleccionadas con alto contenido de este mineral. Para la extracción de la piedra se pueden emplear explosivos o máquinas excavadoras. Los explosivos son empleados en terrenos de difícil acceso mecánico, colocándose estos en agujeros lo suficientemente espaciados y a una profundidad entre 2 a 6 metros de profundidad. En ocasiones se pueden extraer las materias primas únicamente con maquinaria, esto dependiendo de la dureza de la roca (Brunt & Lawry, 2015).

### Trituración

Consiste en el proceso para la disminución del tamaño de partícula. Este proceso es muy variado y está en función del tipo de horno de calcinación, la temperatura y el tiempo que la planta emplee. En algunos casos se tritura hasta partículas entre 0.5

mm a 2 mm de diámetro. Para otros tipos de hornos como el TSR (Horno doble regenerativo, por sus siglas en inglés) se utilizan calizas entre 2.5 a 10 cm de diámetro. Esto se debe a que estas rocas contienen espacios de aire, con lo cual se permite que el aire caliente del horno fluya de mejor manera (Spiropoulos, 2015).

### Calcinación

Este mismo autor plantea que, el calor que se suministra a la caliza para su transformación produce un primer efecto que consiste en la evaporación del agua de cantera. Posteriormente sigue aumentando la temperatura hasta conseguir la descomposición de la caliza. Se pensaba que el calor empleado para evaporar el agua de cantera era calor perdido, pero Gay Lussac demostró que la presencia de agua y del vapor por ella producido facilita el proceso de disociación.

Además, señala que, la cal se produce por calcinación de las rocas calizas mediante flujos de aire caliente que circula en los huecos o poros de los fragmentos rocosos; las rocas pierden dióxido de carbono, teniendo como resultado un producto principal: Óxido de Calcio (CaO), producto de la transformación del Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) conocidos también como Cal Viva. Debido al tamaño y forma homogénea de los fragmentos, la cocción ocurre de la periferia hasta el centro quedando perfectamente calcinada la roca. En la calcinación con el uso de un horno se aprovecha la propiedad más importante de la materia prima, que es la descomposición térmica. Todas las rocas se descomponen a elevadas temperaturas formando óxidos y liberando gas CO<sub>2</sub>.

Para el caso de la caliza o carbonato de calcio:  $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

De igual forma plantea que el carbonato de calcio es sometido dentro del horno a temperaturas mayores a 900°C dependiendo de la presión, tamaño de la roca e impurezas, liberando dióxido de carbono, dejando una roca en su mayoría compuesta por óxido de calcio. Hay tres factores esenciales en la cinética de la descomposición de la caliza.

1. La roca debe ser calentada a la temperatura de disociación de los carbonatos.
2. Esta temperatura mínima (pero prácticamente una temperatura mayor) debe ser mantenida por cierta duración.
3. El gas del dióxido de carbono que se desarrolla debe ser removido.

Existen numerosas variables que requieren métodos de prueba y error para una actuación óptima y modificaciones empíricas delicadas (menudo impulsivo) para operar eficientemente. Como evidencia de esto ingenieros de alta especialidad con importantes grados técnicos y con una extensa experiencia en otros procesos piroquímicos algunas veces encuentran complejas dificultades operativas en la calcinación de la cal (Curi, 2018).

Posteriormente se somete a un proceso de enfriamiento para que la cal pueda ser manejada y los gases calientes regresen al horno como aire secundario, el proceso siguiente es la inspección cuidadosa de muestras para evitar núcleos o piezas de roca sin calcinar. Se somete a cribado, separando a la cal viva en trozo y segmentos de la porción que pasará por un proceso de trituración y pulverización (Otero, 2016).

### **2.7.3 Hidratación.**

Este paso del proceso se lleva a cabo si el objetivo es producir  $\text{Ca(OH)}_2$  o cal apagada. Para lograr esto, la cal viva es expuesta al agua a través de un hidratador que genera un material particulado fino. Luego las partículas son clasificadas mediante separadores de aire, la cal hidratada se somete a una molienda fina para obtener un material homogéneo. Se clasifica el producto y se lo envía al proceso de envase (Brunt y Lawry, 2015).

### **2.7.4 Cribado y almacenaje**

Esta es la última y está en función del tipo de cal a despachar. Si se trata de una cal viva esta no se puede almacenar por mucho tiempo (ya que se hidrata por ser altamente higroscópica) por lo cual, es rápidamente envasada en recipientes impermeables y herméticos. En el caso de la cal apagada, esta se puede suministrar en polvo o en pasta, teniendo el cuidado de evitar su carbonatación, por lo cual se almacena en recipientes secos y libres a aire (Espiropoulos, 2015).

## **2.8 Generalidades de la cal en el proceso de obtención del azúcar**

La cal juega un papel principal en la producción de azúcar y es indispensable para su obtención, ya que adiciona al proceso en forma de lechada para mezclarla con el jugo de caña y nivelar el pH del mismo hasta la neutralidad, evitando así la inversión de la sacarosa en un medio ácido. Hasta la fecha, la ciencia y la tecnología no han podido encontrar un sustituto para la cal en esta industria pues además de nivelar el pH, clarifica el jugo, eliminando del mismo todas las impurezas orgánicas e

inorgánicas en el proceso de refinación de la sacarosa, mismos que estorbarían en las etapas de producción posteriores (NC 1142:2016).

De igual manera la norma plantea que adicionalmente, el calor y la cal incrementan el color debido a que descomponen los azúcares reductores. Para hacer un uso eficiente de la cal, es necesario prestar atención a su forma de adición al proceso, la lechada. La lechada de cal puede elaborarse con diferentes porcentajes de cal, adaptándose a las necesidades de los procesos en los que participe. En el caso de su uso en la clarificación del azúcar, sus condiciones influyen de forma importante en las propiedades por lo que sus parámetros de producción deben ser controlados, con el objetivo de obtener los mejores resultados en el proceso.

La cal tiene un comportamiento particular en base a su solubilidad, ya que, a diferencia de otros reactivos químicos, es escasamente soluble a 0°C y su solubilidad disminuye a medida que aumenta la temperatura de la suspensión, motivo por el cual se considera insoluble a 100°C; en éste sentido para que éste efecto no sea un inconveniente en la optimización de la elaboración de la lechada, se considera una temperatura idónea su elaboración entre 25 y 40 °C. Por su naturaleza y baja solubilidad en agua, es necesario que se considere un tiempo de retención para lograr la mayor hidrólisis posible (Zamora, 2013).

Es indispensable además contar con una excelente calidad de cal, en donde parámetros como el residuo insoluble hacen una diferencia, el codex alimentarius recomienda algunas características para la cal que se usa como aditivo químico alimentario, tanto en el tema de calidad como de inocuidad, en éste sentido, la especificación recomienda no sobrepasar de 1% en éste tema, y es que el exceso de arena y otros insolubles en la cal, pueden acelerar el desgaste de los equipos y pueden ser los causantes de incrustaciones en las tuberías del proceso, sin contar además las adiciones de éste tipo de contaminantes, al utilizar para la elaboración de la lechada, agua cruda, con presencia elevada de iones sulfato (Leyva, Mayo y Hylton, 2016).

Zamora (2013) plantea que la demanda de cal física se incrementa según decrece su reactividad, como consecuencia también se incrementa su transporte y se producen otros efectos colaterales; la cal es el reactivo químico que más peso tiene en la producción de azúcar y su consumo oscila aproximadamente entre 0,65 y 2 kg de óxido de calcio aprovechable por tonelada de caña molida, es por ello que todos los

esfuerzos que se puedan realizar en beneficio de mejorar éste indicador, son ampliamente valorizados en el proceso.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el periodo de noviembre-abril en la Planta de Cal de “Urbano Noris” perteneciente a la Empresa de Servicios Técnicos Industriales, Sucursal Holguín” del municipio de “Urbano Noris”, provincia de Holguín.

El yacimiento se encuentra ubicado a las inmediaciones del caserío Marimón, aproximadamente a 5 km del poblado de San Germán cabecera del municipio de “Urbano Noris”, provincia de Holguín, muy cerca del yacimiento se encuentra la carretera que une a la cabecera municipal con Jaguaní.

Urbano Noris: Municipio de la provincia de Holguín, situado hacia el Sur de esta, en los 20° 36' lat. Norte y los 76° 14' Long. Oeste Limita al Norte, los municipios de Cacocum y Báguano; al Este, la provincia de Santiago de Cuba; al Sur, las provincias de Santiago de Cuba y Granma; al Oeste, el municipio de Cacocum y las provincias de Granma (Diccionario Geográfico de Cuba).

La vía de comunicación en sentido general es buena, existe una carretera pavimentada que une a la ciudad de Holguín (capital provincial) con el poblado de San Germán de donde nace un terraplén que llega a la zona de los trabajos. La región forma parte del sinclinario, Cauto Nipe, caracterizado por elevaciones que alcanzan máximas de 130 m sobre el nivel del mar.

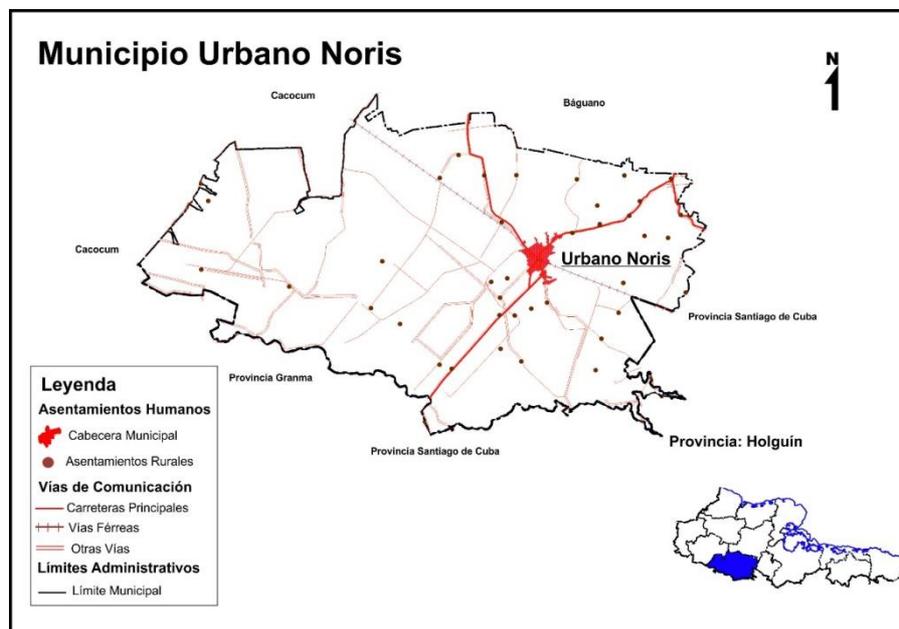
La red hidrográfica se presenta extremadamente pobre detectándose solamente un arroyo intermitente en dirección Norte-Sur, que en tiempos de seca carece de agua. El clima de la región es subtropical con alternancia de períodos secos y lluviosos ocurriendo el primero entre los meses de noviembre-abril y el segundo de mayo-octubre, el periodo anual de las precipitaciones alcanza (1200-1400mm) con una temperatura media anual de 26°C, máxima en Julio de 28°C y máxima en enero de 24°C. La flora está caracterizada fundamentalmente por la caña de azúcar, no obstante, se revelan algunas áreas con pequeños bosques y matorrales de llanura.

Económicamente la región se basa en el desarrollo de la industria azucarera jugando un segundo rol la ganadería. En correspondencia con el desarrollo de la industria azucarera principal renglón exportable del país, el principal establecimiento industrial de la región lo constituye La Empresa Agroindustrial Azucarera (EAA) Urbano Noris.

La fuente de agua potable la constituye una conductora desde el poblado cabecera hasta las instalaciones del yacimiento. La región está conectada a la red nacional de suministro de energía eléctrica. La industria minera está representada por el yacimiento en cuestión y el de calizas para la producción de carbonato de calcio ubicado a unos 6 km del objeto de interés.

Este yacimiento, perteneciente a la Empresa de Servicios Técnicos Industriales (ZETI) representada por la Unidad Empresarial de Base UEB ZETI Holguín, arroja una reserva conocida de 621.8 miles de metros cúbicos, de las que están aprobadas para explotarse 283.2 miles de metros cúbicos, lo que daría una cobertura de explotación para 40 años a los niveles actuales de extracción, pudiendo utilizarse en la producción de áridos finos y cal.

La vía de comunicación en sentido general es buena, existe una carretera pavimentada que une a la ciudad de Holguín (capital provincial) con el poblado de San Germán de donde nace un terraplén que llega a la zona de los trabajos.



**Figura 1.** Ubicación geográfica y Características económicas de la región

## Materiales

- Matraz Erlenmeyer de 500 ml
- Espátula Micro con cucharita

- Probeta de 500 ml
- Bureta Automática de 50 ml
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml
- Matraz Aforado de 250 ml
- Papel filtro N°41
- Pipeta volumétrica 10 ml
- Agitador Magnético
- Embudo de Plástico
- Pizeta de 500 ml
- Cronómetro
- Termómetro de 0 a 100°C
- Recipiente de 1000 ml
- Charola para muestra de 100g
- Pulverizador de Anillos
- Olla para el pulverizador de Anillos
- Baldes de 10 lt
- Recipientes para las muestras
- Brochas
- Espátula
- Crisoles
- Pinzas para crisoles

### **Reactivos**

- Ácido Clorhídrico (1N): para titular oxido de calcio disponible
- Indicador Fenolftaleína al 4%
- Solución Neutralizada azúcar al 40%
- Indicador Anaranjado de Metilo al 0.1%

- Ácido Clorhídrico (1:1): para ataque químico de la caliza y óxido de calcio total
- Murexida
- E.D.T.A (0.02N)
- Hidróxido de Sodio (20%)
- Solución Buffer

### **Equipos**

- Agitador Magnético
- Horno eléctrico (mufla)
- Plancha de Calentamiento
- Balanza Analítica
- Agitador vertical
- Chancadora de quijadas
- Dura Tap
- Serie de Mallas o Tamices ASTM
- Balanza de precisión
- LECO CS 744
- Acelerador Iron Chip
- Acelerador Leco Cell

Para la determinación del porcentaje de concentración de  $\text{CaCO}_3$  en la piedra caliza se utilizó la NC 54-27:85 materiales y productos de la construcción calces y calizas. Determinación de carbonatos totales.

### **Preparación de muestra**

1. Se echa lentamente la muestra a la chancadora de quijadas.
2. Cerrar la tolva de recepción y esperar que triture la muestra, cuando termine de triturar la muestra descargar el cajón de recepción del chancado para evitar atascos.

3. Repetir desde el paso 1 al 2 hasta triturar toda la muestra.
4. El total de la muestra se homogeniza en el cuarteador cilíndrico. Posteriormente se cuartea en el cuarteador cilíndrico hasta obtener 0.5 Kg 0.3 kg de muestra.
5. A continuación, el total de la muestra de 0.5 Kg 0.3kg se deposita en la olla de pulverizado se tapa cuidadosamente y se coloca en el pulverizador de anillos por minutos obteniendo una muestra 100% - M 200 para muestras de caliza.
6. Sacar la olla del pulverizador de anillos y descargar la muestra cuidadosamente limpiando con una brocha hasta que se descargue totalmente la muestra pulverizada, homogenizar la muestra.
7. Depositar y sellar la muestra en un recipiente debidamente codificado con la procedencia de la muestra para su análisis en laboratorio de control de calidad.

### **Análisis granulométrico de la piedra caliza**

Este factor es muy importante en la etapa de calcinación de la piedra caliza ya que existen granulometrías muy grandes en las cuales la temperatura no llega a calcinar hasta el núcleo de la piedra caliza lo cual generan crudos, las granulometrías pequeñas se re-calcinan es decir hay presencia de CaO quemado; es muy importante controlar esta variable para evitar estos defectos mencionados. Los valores de la granulometría de la caliza se tomaron en el procedimiento de obtención de Cal de La Empresa de Servicios Técnicos Industriales. Se seleccionó la cantidad de 120 kg de caliza extraída a distintas granulometrías como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla N° 1 Análisis granulométrico de la piedra caliza

<b>Piedra</b>	<b>tamaño</b>			
<b>No. de malla (milímetros)</b>	60	70	80	90

Fuente: metodología de La Empresa de Servicios Técnicos Industriales, 2022.

### **Tiempo de residencia**

El tiempo es un factor importante en la calcinación de la caliza, siendo recomendable

determinarlo para asegurar una calcinación uniforme (tanto en la superficie como en el interior de la caliza). Teniendo esto presente, nos centraremos en el tiempo

de residencia en el horno mufla. Hay un tiempo de referencia en el cual se trabaja a nivel industrial dependiendo del tipo de horno que se maneja; pero siendo muy extenso se optó lo que corresponde a nivel de laboratorio los cuales serán 4, 6; 8 y 10 horas (Metodología de La Empresa de Servicios Técnicos Industriales,2022).

### Temperatura de calcinación

En la etapa de calcinación de la piedra caliza el control de la temperatura favorecerá un mejor rendimiento en la obtención de óxido de calcio (cal viva). Con el empleo de temperaturas bajas, la calcinación es lenta lo que puede ocasionar crudos en la cal, las altas temperaturas pueden ocasionar óxido de calcio quemado dependiendo del tiempo de residencia en el horno. La temperatura de calcinación que se propone es de 900°C y 1000 °C (Mohamad, & Chemco Systems (2020).

A continuación se muestran los valores fijados de cada variable en la tabla siguiente:

Tabla No.2 Rangos de Granulometría de piedra caliza, Concentración de carbonato de calcio, Tiempo de residencia y Temperatura de calcinación

	<b>Granulometría de piedra Caliza</b>	<b>Concentración de carbonato de calcio</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Temperatura de calcinación</b>
<b>RANGO</b>	25-50 mm	95 – 97 %	4; 6; 8 y 10 horas	> 900 °C
<b>AUTORES</b>	Mohamad, H. & Chemco Systems (2002)	Hernández, V. & Arenas, A. & Cárcamo, H. & Conejeros, V. & Coloma G. (1995).	Metodología de(ZETI) 2022	Mohamad, H. & Chemco Systems (2002)
<b>PROPUESTA DEL AUTOR</b>	60,70,80 y 90	94.38 y 99.52	4; 6; 8 y 10 horas	900 y 1000°C

Fuente: Elaboración propia

No. de ensayos	No. de malla en mm	CaCO <sub>3</sub>	t de residencia (horas)	Tº de calcinación (ºC)
1	60	94.38	4	1000
2	70			
3	80			
4	90			
5	60		6	
6	70			
7	80			
8	90			
9	60		8	
10	70			
11	80			
12	90			
13	60		10	
14	70			
15	80			
16	90			
17	60	99.52	4	1000
18	70			
19	80			
20	90			
21	60		6	
22	70			
23	80			
24	90			
25	60		8	
26	70			
27	80			
28	90			
29	60		10	
30	70			
31	80			
32	90			

No. de ensayos	No. de malla en mm	CaCO <sub>3</sub>	t de residencia (horas)	T° de calcinación (°C)
1	60	94.38	4	900
2	70			
3	80			
4	90			
5	60		6	
6	70			
7	80			
8	90			
9	60		8	
10	70			
11	80			
12	90			
13	60		10	
14	70			
15	80			
16	90			
17	60	99.52	4	900
18	70			
19	80			
20	90			
21	60		6	
22	70			
23	80			
24	90			
25	60		8	
26	70			
27	80			
28	90			
29	60		10	
30	70			
31	80			
32	90			

Fuente: Elaboración propia

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **4.1 Determinación de la piedra caliza que contenga la mayor concentración de carbonato de calcio**

Se tuvo en cuenta el Informe Geológico titulado Informe de Búsqueda Detallada y Exploración Orientativa y Detallada de Calizas para Áridos Finos y Cal en el Yacimiento "Piedra Urbano Noris".

El objetivo de estos trabajos estaba orientado a evaluar y caracterizar las calizas de este yacimiento como fuente de suministro para la producción de áridos finos y cal. Como se concibió originalmente se ejecutaron tres estudios de la Investigación Geológica. Búsqueda Detallada, Exploración Orientativa y Exploración Detallada.

Durante la Búsqueda Detallada con ayuda de dos perfiles perpendiculares entre sí y los ubicados aproximadamente a 200 m se comenzaron los trabajos de perforación. Se ejecutaron los pozos P-1, P-2, P-3, P-4 y P-5, con un metraje total de 115,10 m. Como promedio 23,02 m.

Luego de concluidos estos trabajos iniciales se pasó a la Exploración Orientativa con el objetivo de aumentar el grado de estudio existente hasta el momento. Fueron perforados los pozos P-6, P-7 y P-8 ubicados en un mismo perfil, quedando conformada una red regular de 200 x 200 m.

No obstante, en ocasiones por cuestiones de la topografía de relieve no fue posible conservar la distancia antes mencionada. El metraje total perforado fue de 62,00 m, para un promedio por pozos de 20,67 m.

La Exploración Detallada (máximo grado de estudio proyectado) se ejecutó con la ayuda de los pozos P-11, P-12, P-13, P-14, P-15, P-16, P-17, P-18 y P-19, con un volumen perforado de 233,70 m, para un promedio de 25,97 m, estos pozos conformaron una red aproximada de 100 x 100 m.

En sentido general durante la ejecución del Proyecto se perforaron 410,00 m, como promedio 24,16 m por pozo. La calidad de los trabajos de perforación partiendo de las condiciones técnicas existentes se puede catalogar de aceptable. No obstante, la recuperación general fue de 87,8 %, debido fundamentalmente a las difíciles condiciones geológicas, donde el material se encuentra muy fragmentado y mezclado con arcillas.

De los pozos perforados el de mayor incidencia en este aspecto fue el P-16 con una recuperación de 75,68 %. Inicialmente en la concesión de explotación Urbano Noris se explotó para la producción de cal, utilizada en la industria azucarera y para áridos finos.

El volumen de recursos precedente obtenido fue 752 485, 36 m<sup>3</sup> en categoría de C<sub>2</sub>b<sub>2</sub>, para su posible uso en la producción de áridos y cal. Se tiene en cuenta que la materia prima estudiada en la investigación anterior fue evaluada para la producción de cal y áridos finos no pudiendo ser para áridos gruesos por los altos valores de absorción.

En este nuevo cálculo se analizaron dos bloques en categorías de Medido, uno para cal y otro para áridos finos, así como un bloque en categoría de Indicado para cal y áridos.

Según los resultados pretéritos de los componentes químicos promedios determinados para estas calizas en todo el yacimiento, recogido en el informe Búsqueda Detallada y Exploración Orientativa y Detallada de Calizas para Áridos Finos y Cal en el Yacimiento "Piedra Urbano Noris" se comportan de la siguiente forma:

SiO<sub>2</sub> <0,5 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <0,1 %; TiO<sub>2</sub> < 0,025 %; CaO (52,56 – 56,39) %; MgO <0,1 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <0,1 %; PPI de (31,11 – 43,77) %; NaO <0,05 %; K<sub>2</sub>O <0,05 %; MnO <0,05 %; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> <0,02 %; SO<sub>3</sub> <0,1 % y el CaCO<sub>3</sub> de (94,38 – 99,52) %.

En los resultados de los estudios realizado en esta investigación arrojo que la cantera destinada para la producción de cal con destino a las Empresas Azucareras, cuenta la calidad requerida para el proceso de obtención de Cal, por sus altos niveles de pureza de carbonato de calcio en la piedra caliza de un 94,38 - 99,52%, coincidiendo con los requisitos exigidos por la norma 54-27:85 que indica que la pureza de la piedra caliza tiene que ser superior al 92% de contenido de carbonato de calcio, en el trabajo de postgrado realizado por (Alba Pérez, 2016) las calizas ricas en calcio de alta calidad contienen 97 – 99 % CaCO<sub>3</sub>.

#### **4.2 Determinación de los valores óptimos de calidad de la granulometría de piedra caliza, tiempo de residencia y temperatura de calcinación que permitan obtener la mejor calidad en óxido de calcio y cumpla con las normas de calidad para la producción de azúcar**

En la búsqueda de los valores óptimos calidad de la granulometría de piedra caliza, tiempo de residencia y temperatura de calcinación que permitan obtener la mejor calidad en óxido de calcio para la fabricación de azúcar, se realizaron 64 prueba con el objetivo de buscar los mejores porcentos del óxido de calcio (CaO) en el proceso de calcinación y de esta manera lograr satisfacer las necesidades de la industria azucarera.

Se ajustó el molino de mandíbula a la medida de 90mm y se colocó el paño de la zaranda +60 y -90mm de tal manera que nos permitiera obtener una granulometría uniforme ya que están son las dimensiones en las

cuales se realizarían las pruebas en el laboratorio. En el proceso de calcinación que se realizó en horno mufla en el laboratorio de la calera, se dieron tiempos de residencia de 4, 6, 8 y 10, la temperatura se fue aumentando gradualmente en 50°C hasta alcanzar la temperatura de 900 y 1000°C en busca de obtener la cal viva requerida por los Centrales Azucareros.

Tabla N°. 5: Resultados del Porcentaje de CaO disponible por muestra, considerando las variables de estudio granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio y tiempo de residencia a una Temperatura de calcinación de 900 °C.

No. de ensayos	No. de malla en mm	CaCO <sub>3</sub>	t de residencia (horas)	T° de calcinación (°C)	CaO Total (%)
1	60	94.38	4	900	51.37
2	70				43.23
3	80				40.45
4	90				34.03
5	60		6		65.51
6	70				56.80
7	80				53.11
8	90				47.03
9	60		8		78.78
10	70				73.54
11	80				66.77
12	90				59.91
13	60		10		83.27
14	70				82.80
15	80				77.21
16	90				73.88
17	60	99.52	4	900	51.84
18	70				45.35
19	80				40.68
20	90				34.45
21	60		6		65.97
22	70				58.87
23	80				53.74
24	90				47.91
25	60		8		79.77
26	70				72.90
27	80				67.08
28	90				62.78
29	60		10		84.11
30	70				82.58
31	80				79.62
32	90				74.77

Se observó que a mayor tiempo de residencia y a menor granulometría de caliza, es mayor el porcentaje de óxido de calcio disponible.

Los mejores resultados logrados, en la temperatura de calcinación de 900 °C y concentración de carbonato de calcio de 94,05% expresados como porcentaje de CaO disponible fueron de 84,11% a 60 mm de granulometría y 10 hrs de tiempo de residencia. En la concentración de carbonato de calcio de 92,52 % donde con las mismas condiciones de estudio se obtuvo 83.27 % de CaO disponible.

Tabla N° 6: Resultados del Porcentaje de CaO disponible por muestra, considerando las variables de estudio granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio y tiempo de residencia a una Temperatura de calcinación de 1000 °C

No. de ensayos	No. de malla en mm	CaCO <sub>3</sub>	t de residencia (horas)	T° de calcinación (°C)	CaO disponible (%)
1	60	94.38	4	1000	80.38
2	70				77.25
3	80				73.95
4	90				71.45
5	60		6		85.76
6	70				83.83
7	80				77.68
8	90				75.19
9	<b>60</b>		8		<b>89.85</b>
10	70				85.02
11	80				81.01
12	90				76.23
13	60		10		85.23
14	70				86.12
15	80				83.04
16	90				79.00
17	60	99.52	4	1000	81.56
18	70				78.02
19	80				73.65
20	90				71.08
21	60		6		85.56
22	70				84.19
23	80				78.12
24	90				76.72
25	<b>60</b>		8		<b>90.89</b>
26	70				87.63
27	80				82.50
28	90				78.94
29	60		10		87.43
30	70				86.82
31	80				84.83
32	90				81.12

Los mejores resultados logrados, en la temperatura de calcinación y concentración de carbonato de calcio de 99,52 expresados como porcentajes de CaO fueron de 90,89% a 8 horas de tiempo de residencia y 60 mm de granulometría. En la concentración de carbonato de calcio 94.34% donde con las mismas condiciones de estudio se obtuvo 89,85% de CaO.

Las variables evaluadas las cuales son granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio, tiempo de residencia y temperatura de calcinación, las 4 variables a la vez tienen una influencia para obtener el mejor rendimiento de cal viva.

Ninguna de estas variables es menos importante en la etapa de calcinación de la piedra caliza, los mejores resultados logrados en el estudio realizado fue en la temperatura de calcinación y concentración de carbonato de calcio de 99.52 expresados como porcentajes de CaO fueron de 90.89% a 8 horas de tiempo de residencia y 60 mm de granulometría.

Coincidiendo con los estudios realizados por Boynton (2016) donde plantea que la cal se obtiene al calcinar las rocas a una temperatura entre los 900 y 1.200°C, obteniéndose mejores resultados a la temperatura de 1000°C con una granulometría de 60-70 mm, dependiendo del tipo de piedra caliza.

De la misma manera (Curi, 2018) planteó que para obtener la cal viva se dispone a calcinar piedras calizas a temperaturas entre 900-1000°C y la Piedra Caliza Cálcica, con alto contenido de Calcio, cuando se calcina, tiene entre un 90 y 95% de CaO.

## V. CONCLUSIONES

1. Entre las muestras de piedra caliza que presentaban diferentes concentraciones de carbonato de calcio (92,23 %, 94,38 % y 99,52 %) a partir del informe preliminar realizado por la Empresa Geominera Oriente, se seleccionó las muestras que contenían 94,34 % y 99,52 %.
2. Para las dos concentraciones seleccionadas se determinó la granulometría, tiempo de residencia y temperatura de calcinación adecuadas que fueron 60 milímetros, 8 horas y 1000 °C respectivamente. Obteniéndose óxidos de calcio disponible 90,89 % y 89,85 % para las dos muestras anteriormente citadas.

## **VI. RECOMENDACIONES**

La realización de otras investigaciones que permitan sustentar mejor el rendimiento en la obtención de cal viva.

La realización de nuevos procedimientos de escalamiento a nivel piloto para luego llévalo a escala industrial, debido a que la experimentación no se logró realizar a nivel de laboratorio.

## Bibliografía

Leyva, M ; Pacho, A y Hylton, D. (2016) Documento de Trabajo con la Información Básica para la Operación de la Calera de Urbano Noris.

Castillo, F. (2016) propuesta de implementación de mejoras en el método de verificación en una planta de hidróxido de calcio. Tesis para ingeniero Químico.

Tlaloc, S. (2013) Propuesta de mejoras en el sistema de control para una hidratadora. Tesis para ingeniero Mecánico.

Fombella A. (2020) El empleo de los refractarios en los hornos de fabricar cal. Conferencia pronunciada en la X Reunión Técnica de la sección de refractarios de la S.E.C.V. Sevilla.

Montaluisa, A. ; Edison, R.; Chávez, T y Henry G. (2014) Diseño de un horno para la producción de cal viva y de cal hidratada de 120Tn de producción diaria. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito.

Morales, H y Mestre, O. (2016) Automatización Calera Urbano Noris. Memoria Descriptiva

Harrison, D. (2015). Industrial Mineral Laboratory Manual. Mineralogy and Petrology Series, United Kingdom.

Nelson , S. (2015). Metamorphism and Metamorphic Rocks, New Orleans, USA: Tulane University. Recuperado de <http://www.tulane.edu/sanelson/eens1110/metamorphic.pdf> Consultado: mayo de 2022.

Otero, A. (2016). La cal. España: Escuela Superior de Ávila. Disponible en la dirección: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-los-materiales/contenido/TEMA%201%20-%20LAS%20ROCAS%20EN%20LA%20CONS> Consultado: septiembre de 2022.

Alfaro, L. (2015). La Caliza (pp. 4). ). Disponible en la dirección: <repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/4481/1/TESINA%20149.pdf>. Consultado: octubre de 2022.

Pérez, A. (2016) Tipos de cal. Disponible en la dirección: [www.fical.org/index.php?...id...termodinamica-y-cinetica-del-proceso...](http://www.fical.org/index.php?...id...termodinamica-y-cinetica-del-proceso...)

Consultado: septiembre de 2022.

Álvarez, C. (2014). La Cal ¿Es un Reactivo! (pp. 38-42)., 1 ed., Chile.

Disponible en la dirección:

[www.cbb.cl/cementos/PutDocument.aspx?File...La%20Cal%20¿Es%20Un%20](http://www.cbb.cl/cementos/PutDocument.aspx?File...La%20Cal%20¿Es%20Un%20)

[0Re.pdf](http://www.cbb.cl/cementos/PutDocument.aspx?File...La%20Cal%20¿Es%20Un%20). Consultado: septiembre de 2022.

Cengel, A., Termodinámica (pp. 733-751), Tomo II., 2a ed., México D.F.-

México., Mc. Graw Hill., 2013. Diseño de una planta para la producción de cal

(18 feb. 2014). Disponible en la dirección: [es.slideshare.net/groverporta/diseo-](http://es.slideshare.net/groverporta/diseo-de-una-planta-para-la-produccion-de-cal)

[de-una-planta-para-la-produccion-de-cal](http://es.slideshare.net/groverporta/diseo-de-una-planta-para-la-produccion-de-cal) Consultado: octubre de 2022.

Dirección asociación nacional de fabricantes de cales y derivados de España

Disponible en la dirección:

[www.ancade.com/files/documentacion/documentos/aplicacionesancade.pdf](http://www.ancade.com/files/documentacion/documentos/aplicacionesancade.pdf)

Consultado: septiembre de 2022.

Grupo Calidra química natural. "Manual de competencias de calcinación" (pp.

3; 5- 7; 31- 35; 37 - 40). México.

Hernández, V.; Arenas, A. ; Cárcamo, H. ; Conejeros, V y Coloma, G.

(2015). "La Cal en la Metalurgia Extractiva" (pp. 3, 10-16), 1º edición. Chile,

Antofagasta: Universidad Católica del Norte.11. Industria y Construcción ¿qué

es la cal? (Sin año). Disponible en la dirección: [www.misrespuestas.com](http://www.misrespuestas.com) >

Industria y Construcción 12. Consultado: septiembre de 2022.

Korpella R. (Sin año). Qué características tiene la piedra caliza. Disponible en

la dirección: [www.ehowenespanol.com](http://www.ehowenespanol.com) > Hobbies 13. Luna Córdova, J.

Consultado: octubre de 2022.

Minería Metálica y no Metálica en el Perú (pp. 45). Disponible en la

dirección: [www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLI...](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLI...)

Consultado: agosto de 2022.

Lerch, A. (02 de Julio 2019). Información general y funcionamiento, AK632 –

Calidra de oriente (pp. 40-46). Acajete, Puebla, México.

Mohamad, H. y Chemco Systems, L. P. Publicación. Factores que Afectan La

Calidad de La Cal Viva (CaO) desde el Mineral hasta el Procesamiento Para

su Uso. Disponible en la dirección: [www.agt.cl/mining/doc/CalidadCalViva.doc](http://www.agt.cl/mining/doc/CalidadCalViva.doc)  
Consultado: septiembre de 2022.

Stulz, S y Mukerji, G. (2015). Materiales de construcción apropiados. Alemania. Disponible en la dirección: [ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms08.htm](http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms08.htm)  
Consultado: agosto de 2022.

Ruiz Hinojosa, M. (2014). Metalurgia Extractiva. Disponible en la dirección: [https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Ruiz.../5630c5e208ae8eb6f2739195](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Ruiz.../5630c5e208ae8eb6f2739195). Consultado: octubre de 2022.

Textos científicos (2015). Cales, Compuestos de Calcio. Disponible en la dirección: [www.textoscientificos.com/quimica/cales](http://www.textoscientificos.com/quimica/cales) 20. Consultado: septiembre de 2022.

Universidad de Castilla - La Mancha (España). Departamento de Química Analítica y Tecnología de Alimentos. Química Analítica Aplicada, Materiales calizos y silíceos. Disponible en la dirección: <https://www.uclm.es/profesorado/jmlemus/T-09> .ppt Consultado: septiembre de 2022.

ASTM C110, 2016. Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime and Limestone. ASTM Internacional. Pennsylvania USA.

AustStab, A. (2017). Lime stabilization practice. AustStab Technical Note, 8. Disponible en la dirección: <http://www.auststab.com.au/wordy/wp-content/uploads/2017/02/Lime-Stabilisation-Practice.pdf> Consultado: septiembre de 2022.

Brunt, P y Lawry, W. (2015). The Lime Industry. Chemical and Soils. Disponible en la dirección <https://nzic.org.nz/ChemProcesses/soils/2B.pdf> 4. Consultado: octubre de 2022.

Cifuentes, M., (2015) Determinación del grado de deshidratación del Yeso en la producción de cemento por medio de análisis termogravimétrico. (Tesis de Química Pura) Universidad de San Carlos de Guatemala.

CIMPROGETTI. (2013). Raw materials characterization for industrial lime manufacturing. vdz, 9. Disponible en la dirección [https://www.researchgate.net/publication/259081147\\_Raw\\_materials\\_characterization\\_for\\_industrial\\_lime\\_manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/259081147_Raw_materials_characterization_for_industrial_lime_manufacturing) Consultado: septiembre de 2022.

De Sousa F., (2013). Thermogravimetric analysis of limestones with different contents of MgO and microstructural characterization in oxy-combustion. Departamento de Materiales, Universidad Federal de Rio Grande, Brasil. Disponible en la dirección: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040603113001251>

Consultado: octubre de 2022.

Ellison P. (2018). Hydraulic lime Mortars. Penn Libraries, University of Pennsylvania Disponible en la dirección: <http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1489&context=hp>

Consultado: mayo de 2022.

Fraley, C. & Raftery, E. (2018). How many clusters?. Which clustering method?. Answers via model-based cluster analysis. The computer Journal.

Freas R., & Hayden J., (2015). Limestone and Dolomit. USA: Industrial Minerals and Rocks.

Harrison, D. (2016). Industrial Mineral Laboratory Manual. Mineralogy and petrology Series, United Kingdom. Disponible en la dirección: [https://www.bgs.ac.uk/research/international/dfid-kar/wg92029\\_col.pdf](https://www.bgs.ac.uk/research/international/dfid-kar/wg92029_col.pdf)

Consultado: septiembre de 2022.

Hassibi, M. (2015). Factors affecting the quality of quicklime (CaO) Chemco Systems L.P. Disponible en la dirección: <http://www.chemcosystems.net/Files/Admin/Publications/Factors%20Affectin%20the%20Quality%20of%20Quicklime.pdf> Consultado: septiembre de 2022.

Ibañez, J. (2017). Quantitative Rietveld Analysis for the crystalline and amorphous phases in cola fly ashes. Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera. Barcelona, España. Disponible en la dirección: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/94439/4/Iba%C3%B1ez%202013%20Fuel%20105%20314versio%20postprint.pdf> Consultado: mayo de 2022.

Marinoni, N; Allevi, S; Marchi, M & Dapiaggi, M. (2018). A kinetic study of thermal decomposition of limestone using in situ high temperature X-ray powder diffraction. Journal of the American Ceramic Society.

Toledo, M. (2015). Termogravimetric Analysis for exacting requeriments. Suiza: Mettler Toledo. Disponible en la dirección:

[http://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysi/TA-PDF/51724550C\\_V09.13\\_TA\\_Komp\\_Bro\\_e.pdf](http://www.mt.com/dam/Analytical/ThermalAnalysi/TA-PDF/51724550C_V09.13_TA_Komp_Bro_e.pdf). Consultado: agosto de 2022.

Navarro, C., Agudo, E., Luque, A., Navarro, A., & Ortega, M. (2019). Thermal decomposition of calcite: mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals. 16 pdf.

Pérez, J. (2013) Difracción de rayos X, España: Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cartagena. Disponible en la dirección: [http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos\\_12/Cristalografia-en-Espana.pdf](http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/archivos_12/Cristalografia-en-Espana.pdf) Consultado: julio de 2022.

Ramaswamy, S & Raghavan, P. (2018). Significance of impurity mineral identification in the evaluation in the value addition of kaolin - a case study with reference to an acidic kaolin from india.

Shakhashiri, A (2018). Lime: Calcium Oxide. Disponible en la dirección: [www.scifun.org](http://www.scifun.org). Consultado: agosto de 2022.

Spiropoulos, J .(2015). Small Scale Producción of Lime for Building. Deutsche: GTZ. Disponible en la dirección: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.198.9073&rep=rep>. Consultado: septiembre de 2022.

Puleiman, I & Abubakar, A. (2020). Effects of Particle Size Distribution on the Burn Ability of Limestone. Zaria, Nigeria: Department of Chemical Engineering. Disponible en la dirección: <http://infohouse.p2ric.org/ref/29/28522.pdf>. Consultado: julio de 2022.

Tsunekawa, M & Honma, Y. (2019). Removal of Trace Impurity from limestone using flotation techniques. Japan: The Mining and Materials Processing Institute. Disponible en la dirección: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/50/01/171.pdf>. Consultado: septiembre de 2022.

Vargas, J. (2016). Evaluación comparativa de la quemabilidad de harina cruda preparada con materiales de zona de contacto de capas geológicas para la fabricación de clínker en la manufactura de cemento (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química) Universidad de San Carlos de

Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Guatemala. 25p.

Verplanck P. (2017). Carbonatite and Alkaline Intrusion-Related Rare Earth Elements Deposits-A Deposit Model. Reston, Virginia, USA: Geological Survey. Disponible en la dirección: <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/j/pdf/sir2010-5070J.pdf> Consultado: septiembre de 2022.

Vola, G., & Sarandrea, L. (2014). Lime Reactivity Study. Italy: World Cement. Disponible en la dirección: [http://www.cimprogetti.com/K\\_2014\\_EN\\_029.pdf](http://www.cimprogetti.com/K_2014_EN_029.pdf) Consultado: abril de 2022.

Zamora, E. (2013) Principios de tecnología azucarera., Universidad Nacional Experimental De los Llanos Occidentales.

NC 54-06:85 Cal Hidratada y Calizas. Determinación de la humedad.

NC 54-07:85 Hidrato de Cal. Toma de muestras.

NC 54-10:85 Determinación de la pérdida por ignición en cales y calizas.

NC 54-27:85 Determinación de los carbonatos totales en cales y calizas.

NC 54-32:85 Determinación de la resistencia a la compresión.

NC 54-33:85 Determinación del contenido de residuos insolubles en cales y calizas.

NC 54-34:85 Determinación de dióxido de silicio en los residuos insolubles de cales y calizas.

NC 54-279:84 Oxido de calcio e hidrato de calcio. Determinación volumétrica del porcentaje utilizable.

NC 54-285:84 Cal viva. Especificaciones de calidad.

NC 54-286:84 Hidrato de cal. Especificaciones de calidad.

NC 54-298:84 Cales y calizas. Términos y Definiciones.

NC 54-319:85 Cal Hidratada. Determinación de la velocidad de sedimentación.

NC 54-320:85 Cales y calizas. Determinación de la consistencia de la masilla de cal.

NC 54-321:85 Cal viva. Determinación de la velocidad de apagado cales y calizas.

NC 54-323:85 Análisis Granulométrico.

NC 54-324:85 Cales y calizas. Determinación de residuos.

NC 54-325:85 Determinación de elementos pertenecientes al grupo de hidróxidos de amonio en cales y calizas.

NC 54-326:85 Cales y calizas. Determinación de azufres.

NC 54-327:85 Cales y calizas. Determinación fotométrica del fósforo.

NC.54-328:85 Determinación del óxido de magnesio en cales y calizas. Método de ensayo gravimétrico.

NC.54-329:85 Determinación del óxido de calcio en cales y calizas. Método de ensayo gravimétrico.

NC.54-330:85 Yeso calcinado. Especificaciones de calidad.

NC.54-337:85 Determinación del óxido de magnesio en cales y calizas.

NC.54-338:85 Determinación del óxido de aluminio en cales y calizas.

NC.54-339:85 Determinación del óxido de hierro en cales y calizas.

NC.54-340:86 Determinación del óxido de hierro en cales y calizas. Método colorimétrico.

NC.54-341:85 Determinación del óxido de calcio en cales y calizas.

NC.54-342:86 Masilla de cal. Especificaciones de calidad.

NC.92-43:86 Certificación de los equipos de ensayo.

NEA 2947.01:89 Norma de empresa. Hidrato de cal. Especificación de calidad.

NRA 1:06 Cal hidratada para uso en la industria azucarera. Especificaciones.

NC 1142 Cal hidratada y cal viva para el uso en la industria azucarera.

(Editorial de los Oficios de León. Guía Práctica de la Cal y el estuco, 2015).

## ANEXOS



Fig. 1 Roca caliza en su estado natural.



Fig. 2 Yacimiento " Piedra Urbano Noris ".



El Molino de trituración de la piedra caliza



Materia Prima (rajoncillo) para el horno.



Hidratadora de la Planta de Cal de U. Noris



Planta de cal Urbano Noris.