

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

La cal es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza por encima de la temperatura de descomposición del carbonato de calcio que ocurre alrededor de 900 a 950°C. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio).

La Cal se ha utilizado a lo largo de la historia como un material clave en la construcción del imperio romano demostrando su durabilidad y funcionalidad. A pesar de que fue descubierto en la más remota antigüedad, 7.000 años A.C. hoy se fabrica con modernos procesos industriales y se utiliza en gran variedad de aplicaciones (Álvarez, 2008).

La cultura Maya, años 300 a 900 de nuestra era, utilizó la cal en los centros ceremoniales como Copán, Palenque; Chichén Itzá, y otros, estucando y tiñendo sus decoraciones que esculpían. Del mismo modo la utilizaron los Toltecas en Tula y también los Aztecas.

Es en el Renacimiento en el Barroco, entre el siglo XV al XVIII, donde la cal se mezcla con marmolina y pigmentos, para ser utilizada en los estucos y decoración de la Capilla Sixtina (Coloma, 2008).

La cultura Andina, específicamente en el Perú, utilizó la cal en coloraciones de frescos, que también utilizaron los españoles en la época de la colonización. A partir del siglo XVIII se comienzan a producir aglomerantes hidráulicos, es decir, mezclas capaces de endurecer con el agua.

En la revolución industrial europea, en el siglo XVIII y XIX, se fabrican las primeras cales hidráulicas con las cuales se confeccionan morteros y hormigones para construcciones.

Universalmente, hasta el año 1900 el óxido de calcio (cal) era usado exclusivamente en construcción y agricultura. Hoy en día, más del 95% de éste, se utiliza en procesos químicos industriales y en faenas mineras, como un reactivo industrial alcalinizante, purificante de metales, absorbente, neutralizante, coagulante y acondicionante, entre otros

El mercado mundial de producción de cal está destinado para el sector industrial siderúrgico, ambiental, la industria azucarera y la industria de construcción.

El tamaño del mercado mundial de cal se valoró en US\$ 36.000 millones en 2022 y alcanzará los US\$ 68.000 millones en 2028, con una tasa de crecimiento compuesta anual del 10,98% (ILA, 2023).

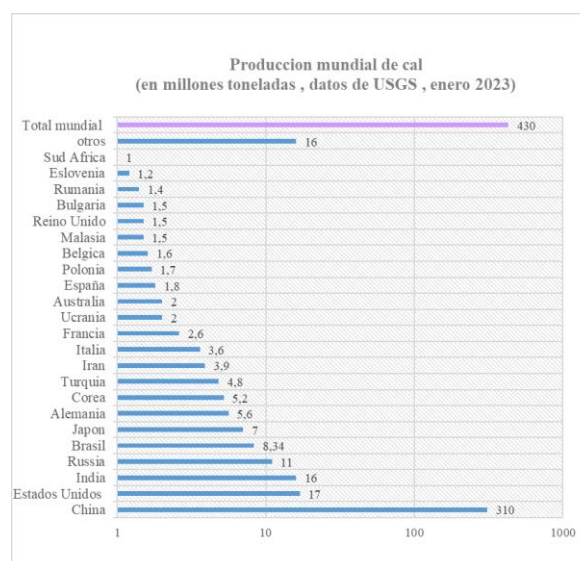
En el mundo se producen más de 430 millones de toneladas de cal, el principal productor es China con cerca del 72% de la producción mundial.

Asia-Pacífico domina la cuota de mercado de cal viva debido a la elevada demanda de este producto en diversos sectores, como el acero, la construcción y las aplicaciones medioambientales.

Las regiones con mayor potencia del mercado de cal viva son América del Norte, Europa, Asia Pacífico, América y Medio Oriente y África.

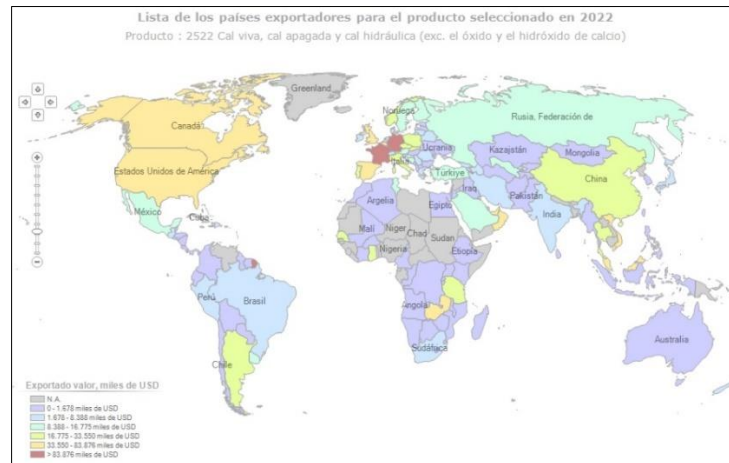
A nivel Latinoamérica los principales productores de cal son Brasil, México, Argentina, Perú y Bolivia, por lo que Bolivia puede incursar en exportar cal a los países vecinos como Chile que desde el año 2015 importa alrededor de 400.000 toneladas (AméricaEconomía, 2025).

Figura 1: Producción mundial de cal



Fuente: Asociación Internacional de la Cal (ILA), 2023.

Figura 2: Países exportadores de cal

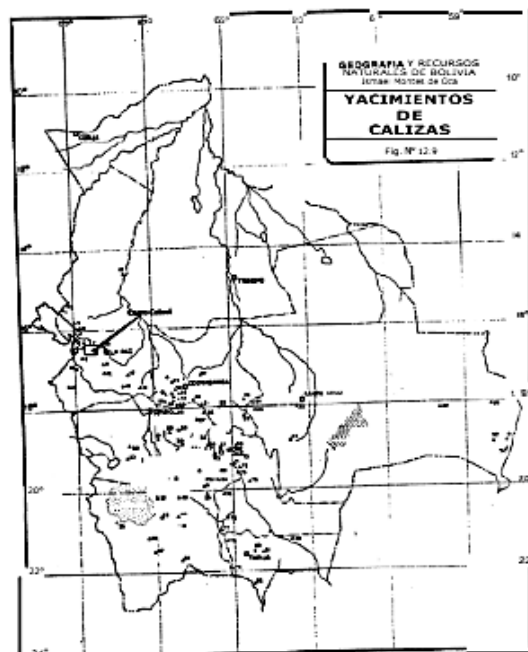


Fuente: Centro de Comercio Internacional (ITC), 2022.

Yacimientos de piedra Caliza en Bolivia

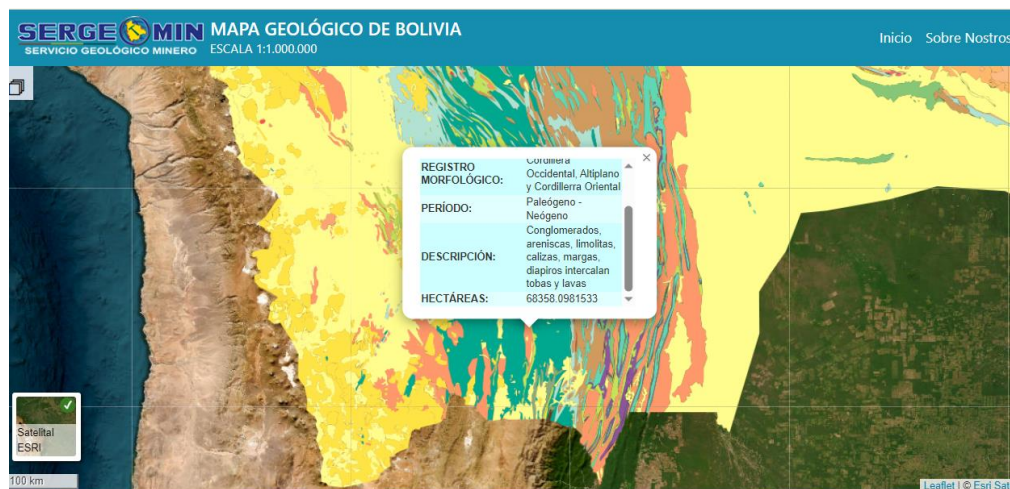
En 2022, la producción de cal en Bolivia alcanzó las 700.000 toneladas. Según el Servicio Geológico de Bolivia, existen 92 yacimientos de cal en Bolivia.

Figura 3: Mapa de Yacimientos de calizas



Fuente: Montes Oca, I., 1976. *Geografía de recursos*.

Figura 5: Mapa geológico de zonas de calizas en El Puente, Méndez, Tarija.



Fuente: Servicio Geológico Minero (SERGEOMIN), 2025.

La figura muestra el mapa geológico del municipio El Puente de la provincia Méndez del departamento de Tarija denota el área analizada que abarca una extensión aproximada de 68.358 hectáreas, donde las variaciones litológicas y estructurales evidencian un alto potencial geológico para la prospección de recursos minerales. Estas condiciones también favorecen la evaluación de materiales de uso industrial, particularmente calizas y arcillas, que constituyen insumos fundamentales en la industria de cal, cemento y la cerámica. Esta zona se perfila como un sector de relevancia geológica y económica dentro del territorio boliviano, debido a su diversidad litológica, las evidencias de actividad volcánica antigua y las condiciones propicias para la formación y concentración de minerales metálicos y no metálicos. (SERGEOMIN , 2024).

Tabla 2: Datos geologicos dela zona El puente, Tarija

Mapa Geológico El puente	
Símbolo	Pg-Ng
Registro Morfológico	Cordillera Occidental, Altiplano y Cordillera Oriental
Período	Paleógeno - Neógeno
Descripción	Conglomerados, areniscas, limolitas,

	calizas , margas, diapiros intercalan tobas y lavas
Hectáreas	68,358.098

Fuente: ID SERGEOMIN (Servicio geológico minero) 2025.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener experimentalmente óxido de calcio a partir de piedra Caliza, recolectada de la cantera del municipio “El puente” de la provincia Méndez, Tarija.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar la piedra Caliza, empleada como materia prima para la obtención de óxido de calcio.

Obtener óxido de calcio a partir de piedra Caliza por calcinación a escala laboratorio

Ajustar los parámetros en condiciones controladas para producción de óxido de calcio

Caracterizar el producto obtenido en el proceso de calcinación de piedra Caliza

Determinar el costo de producción y el rendimiento de obtención del óxido de calcio

JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA

Debido a que el método de calcinación de la piedra caliza, nos dirige a la obtención del óxido de calcio con un alto rendimiento en comparación de otro método empírico o tradicionales donde se desconoce la calidad de cal, la presente investigación sirve para obtener datos del rendimiento, información y validación acerca del método a nivel laboratorio, contribuyendo así en el desarrollo de nuevos proyectos o estudios que se realicen a futuro.

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

En Bolivia el año 2022 se registró la exportación de 2.016 toneladas de cal, y en toda la región se cuenta con más de 92 yacimientos en diferentes departamentos de piedra caliza (SERGEOMIN) de los cuales 16 están en explotación los restantes están como reservas.

Bolivia cuenta con alrededor de 24 millones de toneladas de piedra caliza, siendo factor indicativo para poder ampliar la producción de cal y generar un movimiento económico. Por otro lado, la presente investigación es una herramienta útil para la producción de cal, ya que, al contar con información técnica como la calidad, el rendimiento facilita encontrar nuevos mercados

JUSTIFICACIÓN SOCIAL

En la actualidad la producción de cal en la zona de alta de Tarija se realizan procesos tradicionales para la obtención de cal apagada sin información que identifique la calidad que presenta el producto final (CaO), como es el porcentaje de pureza que se obtiene. Lo que se pretende lograr con la siguiente investigación aplicada es aportar conocimientos a la sociedad de la caracterización de la cal y como mejorar su producción, obtención, su proceso.

JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

El proceso de obtención de óxido de calcio a partir de piedra caliza en laboratorio se realizará por calcinación en mufla eléctrica, un método que permite reducir los impactos ambientales asociados a la producción de óxido de calcio. A diferencia de los hornos que emplean combustibles fósiles, particularmente gas natural o leña y que generan emisiones adicionales de dióxido de carbono, la mufla opera sin combustión directa y, por tanto, evita emisiones asociadas al quemado de combustibles.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.MARCO TEÓRICO

1.1. Piedra Caliza

La caliza es una piedra natural sedimentaria formada, en su mayoría, por carbonato de calcio (CaCO_3), normalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3), también puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hemetita, siderita, cuarzo (Oates, 2008).

Formación de piedra caliza

La piedra caliza se forma a través de una serie de procesos geológicos que ocurren a lo largo de millones de años. Estos procesos incluyen la acumulación, compactación, y cementación de sedimentos principalmente biológicos en ambientes marinos y lacustres (Boyton, 1980).

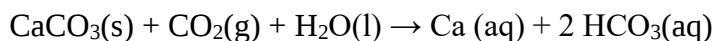
Acumulación y Sedimentación

Este tipo de formación se debe a la acumulación de sedimentos biológicos (restos de conchas, esqueletos de animales y plantas) y se depositan capa tras capa ricas en carbonato de calcio hasta formar lechos masivos de caliza.

Reacciones químicas naturales

Parte de la formación de piedra caliza involucran reacciones de disolución y precipitación, pues el dióxido de carbono (CO_2) disuelve los fósiles ricos en carbonato de calcio formando así bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), este compuesto al cambiar las condiciones de temperatura, evaporación se re precipita como carbonato de calcio, contribuyendo a la formación de la caliza.

Reacción global de disolución



Precipitación del carbonato de calcio



Estas reacciones se dan generalmente cuando los arroyos y ríos actúan como transportadores clave en la formación de la caliza. El agua de lluvia se vuelve ligeramente ácida al pasar por el suelo, lo que le permite disolver el carbonato de calcio (CaCO_3) de las rocas, este carbonato de calcio disuelto se convierte en bicarbonato de calcio soluble, que los cursos de agua transportan a nuevas áreas. Allí, bajo condiciones específicas como un aumento de la temperatura o una disminución de la acidez, el bicarbonato de calcio se vuelve a convertir en carbonato de calcio sólido y precipita, contribuyendo así a la formación de nuevos depósitos de caliza.

1.1.2. Composición química de la piedra caliza

La piedra caliza es una de las rocas químicamente más estables compuestas principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) usualmente en forma de calcita. Este mineral constituye como mínimo la mitad de su composición completa, pero también puede incluir otros minerales como el aragonito, dolomita, cuarzo, arcillas o restos fósiles.

Estas variaciones en su composición generan diferentes clases de caliza, con variaciones en su color, textura y aplicación (Maresch & Medenbach, 1990).

Impurezas

Las impurezas de la piedra caliza se dividen en dos grupos homogéneas y heterogéneas

-Impurezas homogéneas: Son impurezas distribuidas de forma fina y uniforme en la roca durante su formación como el barro, el lodo, la arena y otras formas de sílice, el cuarzo.

-Impurezas heterogéneas: Se presentan como fragmentos o nódulos de otros materiales que se incrustan en la caliza de manera irregular como los fragmentos de silicio, sílex córneo y pedernal.

El siguiente cuadro I-1 muestra una clasificación de las piedras calizas de acuerdo a la cantidad de arcilla que poseen.

Cuadro I-1 Clasificación de piedras calizas y margas

Tipo de Caliza	Contenido de CaCO_3
Caliza de alto porcentaje	96-100%
Caliza margosa	90-96%
Marga Calcárea	75-90%
Marga	40-75%
Marga arcillosa	10-40%
Arcilla margosa	4-10%
Arcilla	0- 4 %

Fuente: Duda, (1977).

Otras impurezas que generalmente aparecen durante la formación de la roca Caliza son; el hierro, el fosforo, azufre, manganeso, cobre y titanio que son de mayor interés para la elaboración de cemento (Boyton ,1980).

La propiedad química relevante para esta investigación es la descomposición térmica que permite que, a altas temperaturas, la caliza pueda descomponerse durante el proceso de calcinación para formar óxido de calcio.

1.1.3. Clasificación de piedra caliza

La clasificación de piedra caliza es de acuerdo a su composición química, puesto que el interés es el porcentaje de óxido de calcio, que tiene la misma para su posterior calcinación (Álvarez ,2008).

Los tipos de caliza más fundamentales son:

- **Caliza de alto contenido de calcio:** Idealmente, es 100% carbonato de calcio. Sin embargo, para fines comerciales, se considera que tiene entre un 97% y 99% de CaCO_3 .

- **Caliza dolomítica:** Su composición ideal es 54.3% de CaCO_3 y 45.7% de MgCO_3 . En la práctica, las calizas dolomíticas de alta calidad contienen entre un 40% y 43% de MgCO_3 , con el resto siendo principalmente CaCO_3 y de un 1% a 3% de impurezas.

Cuadro I-2 Clasificación de caliza por su calidad

Composición química	Tipo de Caliza					
	Local				Exportación	
Variables	Piedra baja		Piedra media		Piedra alta	
	Promedio	Tolerancia	Promedio	Tolerancia	Promedio	Tolerancia
óxido de calcio (CaO)	41,5	41 a 42,7	43 ,41	42.8 a 43,8	44,95	> 43,8
óxido de sílice (Si O ₂)	14,61	>13,30	12,4	12 a 13,3	10,64	< 12
Trióxido de azufre (SO ₃)	0,99	<1,2	0,96	<1	0,78	< 0,8
Trióxido de carbono CO ₃	70,4	70 a 74	75,2	72 a 76,6	78	> 76,6
Oxido de magnesio MgO	2,14	< 2,5	2,1	< 2,5	2,03	< 2,5

Fuente: Esmical S.A. (Especialistas en Minerales Calizos S.A., 2008)

Elaboración propia, 2025.

1.1.4. Características de la piedra Caliza .

Color

Las formas puras de calcita y magnesita son blancas, pero la mayoría de las calizas presentan tonos grises o tostados por impurezas. El gris proviene de materia carbonácea, el tostado y colores como beige, rojo o marrón se deben al hierro, y algunas dolomitas muestran matices rosados. Minerales como piritita, marcasita y siderita pueden modificar el color por oxidación durante la meteorización (Boynton, 1966).

Estructura

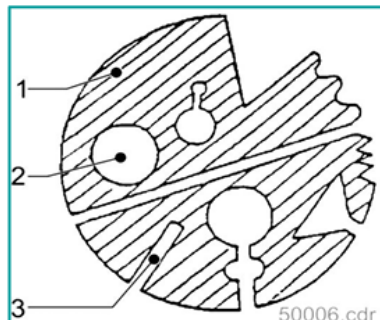
La difracción de rayos X ha revelado que la caliza es cristalina. Sin embargo, el tamaño, la uniformidad y la disposición de su estructura cristalina o granos minerales varían mucho, formando una piedra de diferente densidad y dureza (Boynton , 1966).

Porosidad

La porosidad de la piedra caliza se refiere a la cantidad de espacio vacío que tiene, el cual puede variar significativamente según su grado de compactación y estructura. Su porosidad se define como la relación entre el volumen de los poros y el volumen total de la roca.

Es importante destacar que el volumen de los poros incluye tanto los poros que son accesibles (interconectados) como los no accesibles (aislados).

Figura I-1: Diferentes tipos de poros



Fuente: Instrucción Manual MAERZ, (2009).

Densidad

La densidad aparente de la Caliza varía entre 1,5 y 2,7 g/cm³, aumentando ligeramente si contiene humedad.

Dureza

Tiene una dureza media en la escala de Mohs, alrededor de 3 a 4, la caliza comercial varía considerablemente, entre 2 y 4. Esto significa que es relativamente fácil de rayar con objetos más duros.

1.1.5. Usos de la piedra caliza

Aunque pueda parecer delicada y el paso del tiempo la desgaste, la piedra Caliza sirve de cimiento en estructuras y también se emplea para producir trabajo ornamental.

Sus usos principales se encuentran:

En la industria del cemento

En la construcción de la carretera como componente del concreto

En la industria del vidrio

En la industria siderúrgica como fundente.

En la parte agrícola como corrector de acidez del suelo

1.2. Óxido de calcio (Cal)

1.2.1. Introducción

Define el diccionario de la Real Academia, en su primera acepción, la cal como “Óxido de calcio. Sustancia alcalina de color blanco o blanco grisáceo que, al contacto del agua, se hidrata o se apaga, con desprendimiento de calor, y, mezclada con arena, forma la argamasa o mortero”. (Real academia,2000)

El óxido de calcio (CaO) se obtiene por descomposición térmica del carbonato de calcio (CaCO_3) que proviene de la piedra caliza, este proceso se denomina calcinación para que este inicie la temperatura requerida oscila entre 900°C y 1000°C , lo que conduce a la liberación del dióxido de carbono (CO_2) y a la formación del óxido de calcio (CaO) y otros compuestos en pequeñas cantidades como el óxido de silicio, aluminio y hierro.

La cal es una sustancia blanca sólida que se caracteriza como un reactivo altamente alcalino, por lo cual es útil en una amplia variedad de aplicaciones industriales y comerciales. La alta reactividad del óxido de calcio se debe a su capacidad para reaccionar con el agua y liberar una gran cantidad de calor, lo que lo convierte en un compuesto altamente exotérmico (Álvarez, 2008).

Es necesario denotar que es un producto higroscópico, pues tiende a absorber el vapor de agua presente en el ambiente por lo tanto requiere un empaque hermético para su conservación.

1.3. Propiedades del óxido de calcio

1.3.1. Propiedades Físicas

Color. Generalmente, la cal viva es de color blanco, con diferentes grados de intensidad que dependen de su pureza química. Los tipos más puros de cal viva son los más blancos. gris cenizo, beige o amarillento.

Olor. Posee un olor débil pero distintivo que es difícil de definir, excepto que es ligeramente "terroso" y penetrante en aroma, pero no ofensivo.

Textura. Todas las cales vivas son cristalinas, aunque los conglomerados de cristalitos varían mucho en tamaño y espaciado. Algunas pueden parecer amorfas, pero en realidad son micro cristalinas.

Luminiscencia

Todos los óxidos de cal son muy luminiscentes a altas temperaturas en el rango de calcinación de 900 °C y superiores; de ahí el origen del término "luz de cal" (*lime light*).

Solubilidad e Higroscopicidad

La cal es ligeramente soluble en agua. Sin embargo, es muy higroscópica, lo que significa que tiene la capacidad de absorber la humedad del ambiente. Esta propiedad la hace reaccionar con el agua para formar hidróxido de calcio, una reacción altamente exotérmica (libera mucho calor) que se conoce como "apagado de la cal".

Porosidad

El grado de porosidad de la cal viva comercial varía ampliamente en porcentaje de espacio poroso, desde un 18% hasta un 48%, con un valor promedio de alrededor del 35%. Esto depende de la estructura de la piedra caliza, la temperatura y la severidad de la calcinación.

Estructura cristalina.

La difracción de rayos X revela que el óxido cálcico puro cristaliza en el sistema cúbico.

1.3.2. Propiedades químicas

Composición química del óxido de calcio

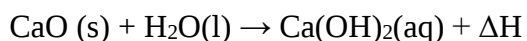
Es un compuesto inorgánico compuesto por calcio (Ca) y oxígeno (O). Su fórmula química es CaO, lo que indica que cada unidad de óxido de calcio está formada por un átomo de calcio y un átomo de oxígeno. El óxido de calcio se obtiene principalmente por la descomposición térmica de la Caliza.

Reactividad

La reactividad de la cal se refiere a la velocidad y facilidad con la que el óxido de calcio, CaO reacciona, principalmente con el agua durante el proceso de hidratación, así como con otras sustancias como ácidos, dióxido de carbono y gases contaminantes.

Esta propiedad química se debe a que el compuesto óxido de calcio está formado por enlaces iónicos fuertes, es decir que presenta una alta diferencia de electronegatividad lo cual genera una transferencia completa de electrones entre el metal calcio (catión Ca^{2+}) y el oxígeno (anión O^{2-}), que cuando al reaccionar con el agua libera iones hidroxilo (OH^-), mostrando su comportamiento básico o alcalino.

Reacción química



Alcalinidad

La propiedad de la cal, es significativa puesto que expresa su capacidad de neutralizar ácidos y aumentar el pH a una solución, por ello se la denomina como una base fuerte.

Composición química del óxido de calcio

Es un compuesto inorgánico compuesto por calcio (Ca) y oxígeno (O). Su fórmula química es CaO, lo que indica que cada unidad de óxido de calcio está formada por un

átomo de calcio y un átomo de oxígeno. El óxido de calcio se obtiene principalmente por la descomposición térmica de la caliza.

**Cuadro I- 3 Características físico-químicas
de los distintos tipos de cal viva**

Propiedad	Unidad	Calcítica	Dolomítica	Magnesiana
Nombre químico		Óxido de calcio	Óxido doble de calcio-magnesio	Óxido de magnesio
Fórmula química		CaO	CaO·MgO	MgO
Peso molecular	(g/mol)	56,08	96,40	40,32
Punto de fusión	(°C)	2.570		2.800
Índice de refracción		1,838		1,736
Calor de solución	(Kcal)	+18,33		
Formación cristalina		Cúbica		Cúbica
Solubilidad a 0 °C	(g/L)	1,40		0,0068
Solubilidad a 100 °C	(g/L)	0,54		0,0030
Peso específico		3,2 – 3,4	3,2 – 3,4	3,65
Densidad en grana	(g/L)	881 – 961	881 – 961	
Calor específico a 100 °F	(BTU/lb)	0,19	0,21	
Ángulo de reposo	(°)		50 – 55	50 – 55
Calor de carbonatación	(Cal/mol)	43.300		28.900
Calor de formación ΔH a 25 °C	°C (Kcal/mol)	-151,7		-235,58
Energía libre ΔG a 25 °C	(Kcal/mol)	-144,3		
Porcentaje de CaO puro	%	100	58,17	

Fuente: National Lime Association , (2008).

Elaboración propia, 2025.

1.4. Tipos de Cal

El sector de fabricación de cal en la zona alta de Tarija engloba las empresas que pertenecen al sector artesanal de producción de cal viva (óxido de calcio), cal apagada (hidróxido de calcio).

En el mercado boliviano circulan otros tipos de cales que a continuación se detallan:

Cal viva: es aquel material que cuenta con la presencia de un 90 % de óxido de calcio disponible en el material suministrado, además de las características propias particulares establecida en la presente norma (NB-647, 2007).

Cales grasas: Son las más blancas, fabricadas con piedras calizas de gran pureza, que en presencia de agua reaccionan con fuerte desprendimiento de calor (NB-647, 2007).

Cales magras: Son más amarillentas, más impuras porque poseen sustancias como arcilla, óxido de magnesio, etc., que en presencia de agua reaccionan con poco desprendimiento de calor (NB-647, 2007).

Cal disponible: Representa el contenido total de cal libre (CaO) en la cal viva o hidratada. Es el componente activo de la cal y se utiliza para evaluar su concentración.

Cal industrial: Se caracteriza por ser muy pura, es un reactivo químico de uso industrial, es empleado en distintos procesos como la neutralización, coagulación, destilación, precipitación, deshidratación y otros.

Cal Aérea: La cal área es la cal viva hidratada a la intemperie, donde se obtiene, generalmente, una mezcla de cal viva, cal apagada y cal recarbonatada

Cal hidratada: Es un polvo seco que se obtiene al hidratar la cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química, formando un hidróxido. Puede ser de alto calcio, magnesiánica, dolomítica o hidráulica (Boyton ,1966).

Cal hidratada hidráulica: Es una forma de cal químicamente impura con propiedades hidráulicas variables. Contiene cantidades apreciables de sílice, alúmina y, generalmente, algo de hierro. Se usa exclusivamente para fines estructurales (Boyton ,1966).

Cal agrícola : Es un carbonatos de calcio natural de muy alta pureza, de tamaño de partícula controlado, con muy baja absorción de aceite y fácil dispersión. Recurso efectivo para mantener el suelo en buenas condiciones, controlando el pH y la acidez del suelo, lo que favorece el crecimiento y la salud de las plantas (Suarez, 1996).

Cal avícola: Es un término que se refiere al uso de diferentes tipos de cal en la industria avícola, principalmente para fines de sanitización y desinfección. No es un tipo de cal distinto en términos de su composición química, sino una aplicación específica de la cal viva o la cal hidratada.

Cal en terrones: Cal viva que se obtiene de hornos verticales en forma de terrón. (Boyton, 1966).

Las normas norteamericanas A.S.T.M. denominan la cal de acuerdo a la utilización que se le otorgue, ya que en cada uso las exigencias técnicas a cumplir son diferentes. En el cuadro siguiente se mencionan algunas de ellas.

Cuadro I-4: Clasificación de tipos de cal de acuerdo a su pureza

Norma ASTM	Porcentaje mínimo de CaO	Descripción
ASTM C5	80% a 90%	Cal viva para fines estructurales. Se usa en estabilización de suelos y fabricación de cemento.
ASTM C206	70% a 90%	Cal hidratada para acabados. El tipo S (especial) tiene mayor contenido de CaO.
ASTM C977	70% a 85%	Cal para estabilización de suelos, mejora la capacidad de soporte y operatividad del suelo.
ASTM C593	70% a 90%	Cal combinada con cenizas volantes y puzolanas para estabilización de suelos.
ASTM C15	80% a 95%	Cal para producción de materiales de construcción (cemento y morteros).
ASTM C1298	85% a 95%	Cal para uso en morteros y concreto, garantiza reactividad y durabilidad.
ASTM C593/C593M	70% a 85%	Cal para estabilización de suelos con aditivos como puzolanas.

ASTM C1447	80% a 95%	Cal agrícola para mejorar el pH del suelo y neutralizar la acidez.
ASTM C1201	85% a 95%	Cal para la desinfección del agua potable, asegura efectividad en purificación y desinfección.
ASTM C150	85% a 95%	Cal para fabricación de cemento Portland, esencial para la reactividad en la producción del cemento.

Fuente: American National Standard ASTM , (2007).
Elaboración propia, 2025.

1.5. Usos de la cal

La cal se caracteriza por su versatilidad, siendo el producto de mayor gama de aplicaciones, pudiendo establecerse en cuatro sectores:

Industrial

En diversos tipos de industrias, principalmente en la la industria del cemento, hierro y el acero, y de manera relevante en la industria metalúrgica, química, papel, azúcar, y también en farmacia, cosmética, alimentación, vidrio y curtidos (ANFACAL, 2010).

Agrícola

Principalmente en el tratamiento de suelos agrícolas como la neutralización de los mismos y como biocida en control de hongos, bacterias, etc.

Medio ambiente

En los tratamientos de potabilización del agua, de depuración de aguas residuales urbanas e industriales (orgánicas, aguas ácidas), de lodos, de desalación, de residuos, de gases y de suelos contaminados.

Construcción.

Especialmente como estabilizador de suelos en carreteras y otras infraestructuras y como material de construcción

Cuadro I-5 Clasificación de usos de la cal por sectores

SECTORES	SUBSECTORES
Industrias varias	Industria sidero-metalúrgica. Industria de refractarios. Industria química. Industria petrolífera. Industria papelera. Industria del vidrio. Industria de curtidos. Industria cosmética.
Industria alimentaria	Industria azucarera. Industria láctea. Piscicultura. Ostricultura. Tratamiento del maíz y trigo Conservación de frutas y verduras. Fabricación de colas y gelatinas. Industria vinícola.
Construcción	Estabilización de suelos. Mezclas bituminosas para carreteras. Morteros y enlucidos. Hormigón celular. Pinturas.
Protección medioambiental	Tratamiento de aguas residuales. Tratamiento de fangos de depuradoras. Potabilización de aguas. Desalinización de aguas. Tratamiento de gases. Tratamiento de residuos. Tratamiento de suelos contaminados.
Sector agrícola	Enmiendas calizas. Biocidas. Tratamiento de purines. Residuos de gallineros. Caldo bordelés. Alimentación animal.

Fuente: Alejandro Sevilla, (2014).
 Elaboración propia ,2025.

1.6. Calcinación

Cuando hablamos de calcinación es necesario mencionar la propiedad más relevante de la piedra Caliza que se denomina descomposición térmica mediante la cual se forma los coproductos óxido de calcio y dióxido de carbono. La reacción que sucede en este proceso es endotérmica por lo tanto requiere calor del sistema para sobrepasar la presión de disociación.

Los tres factores esenciales que afectan la cinética de la descomposición de la caliza son clave para entender el proceso de calcinación y garantizar una reacción eficiente.

La piedra debe ser calentada hasta la temperatura de disociación de los carbonatos.

Esta temperatura mínima (pero en la práctica una temperatura más alta) debe mantenerse durante una cierta duración.

El gas de dióxido de carbono que se desprende debe ser eliminado.

1.6.1. Temperatura de disociación

La temperatura de disociación del CaCO_3 (carbonato de calcio) es un factor crucial en el proceso de calcinación, ya que define la temperatura a la cual el carbonato se descompone en cal (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), es importante denotar que no depende solo de la temperatura y la presión, sino también de su interacción dinámica (Oates, 2008).

Cuando la temperatura y la presión están en equilibrio, la disociación del CaCO_3 es estática. Sin embargo, incluso un pequeño cambio en alguno de estos parámetros (como una disminución en la presión o la concentración de CO_2 , o un aumento en la temperatura) provoca que la disociación avance, con una evolución de CO_2 y la formación de óxidos simultánea. Como conclusión existe una relación definitiva entre la presión de CO_2 , su concentración y la temperatura de disociación.

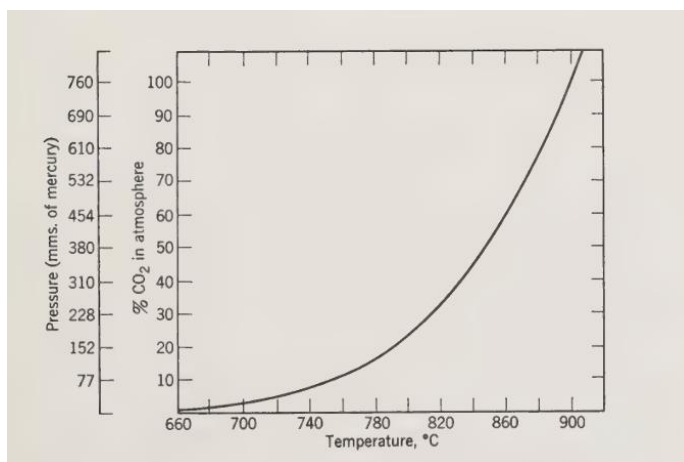
Si la presión de CO_2 se incrementa, la temperatura de disociación también lo hará. Por el contrario, una presión menor de CO_2 reduce la temperatura de disociación.

Cuadro I-6: Valores de equilibrio para la presión del dióxido de carbono a diversas

Temperatura (°C)	Presión (mm Hg)
500	0.11
600	2.35
700	25.3
800	168
900	773
1000	2710

Fuente: National Lime Association, Chemical Lime Facts , (s.f.).

Figura I-2: Influencia de la concentración y presión en la temperatura de disociación de



Fuente: Boynton r. wiley, j. & sons , (1980).

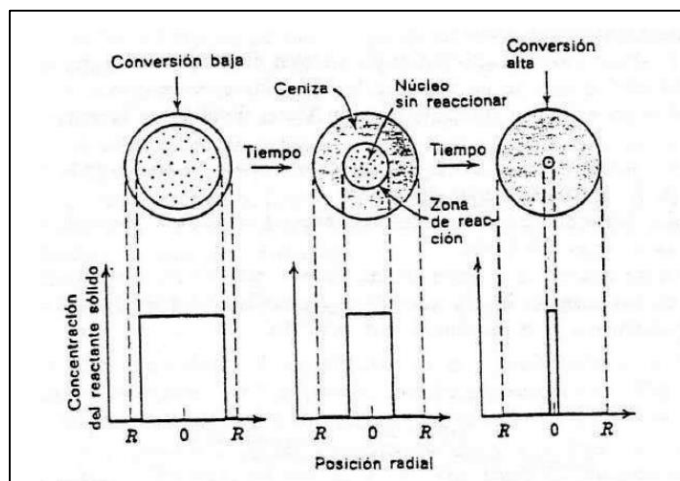
Si la presión parcial de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera circundante es mayor que la presión de equilibrio de la reacción de disociación de la caliza, la reacción tiende a invertirse, produciendo CaCO₃ a partir de CaO y CO₂. Este fenómeno es conocido como recarbonatación, y puede llevar a que el óxido de calcio (CaO) se transforme de nuevo en carbonato de calcio (CaCO₃) bajo condiciones de alta concentración de CO₂.

1.6.2. Precalentamiento y Tasa de calentamiento

Cuando se alcanzan las temperaturas de disociación, la humedad libre presente en la roca se evapora, y una pequeña cantidad de materia orgánica contenida en la caliza se quema. Este fenómeno aumenta ligeramente el requisito térmico previamente mencionado. Por lo tanto, al iniciar la calcinación, la roca se vuelve más porosa y puede presentar una gran cantidad de micro poros y fisuras intersticiales en su estructura cristalina (Alcázar, 2010).

A temperaturas más altas y períodos largos de calcinación, se obtiene una cal viva más duramente calcinada, con un mayor encogimiento, mayor densidad, baja porosidad y menor reactividad química. En cambio, a temperaturas más bajas y períodos de calcinación más cortos, se produce una cal viva altamente reactiva, suavemente calcinada, con mayor porosidad, bajo encogimiento y menor densidad. Esta teoría, basada en observaciones empíricas, ha sido respaldada por diversos investigadores.

Figura I-3: Modelo de reacción de la calcinación (CaCO_3)



Fuente: MET 2213 Pirometalurgia I ,(2009).

Las rocas densas y cristalinas, que presentan granos grandes, tienen una menor porosidad y superficie de contacto disponible para el calor. Este tipo de material posee una baja conductividad térmica, lo que provoca que el calor se distribuya de manera menos eficiente, penetrando más lentamente hacia el interior de la roca. Como

consecuencia, la disociación del CaCO_3 en CaO es más lenta, lo que resulta en un proceso de calcinación menos eficiente.

La baja velocidad de disociación en este tipo de rocas requiere un mayor tiempo de residencia en el horno para asegurar que el proceso se complete completamente. Este incremento en el tiempo de calcinación conlleva un mayor consumo de energía, lo cual impacta en la rentabilidad del proceso. Específicamente, para alcanzar una disociación completa, las rocas cristalinas deben ser tratadas con temperaturas más altas y un control más estricto de los tiempos de calcinación (Levenspiel, 1962).

1.6.4. Pérdida por peso

Durante la calcinación de la piedra Caliza CaCO_3 , el calor provoca su descomposición, liberando dióxido de carbono CO_2 y generando óxido de calcio CaO . Esta liberación de CO_2 se conoce como pérdida por ignición.

También sucede otro proceso denominado re carbonatación el cual ocurre cuando el CO_2 liberado no se evacua adecuadamente y reacciona nuevamente con la cal calcinada, formando otra vez carbonato de calcio.

Los principales factores que hacen que suceda este fenómeno son; la temperatura excesiva, distribución irregular de gases de combustión, retención prolongada en enfriador y la ventilación deficiente.

Las consecuencias de la recarbonatación provocan una disminución de la concentración de óxidos de calcio activos y una baja reactividad del producto final.

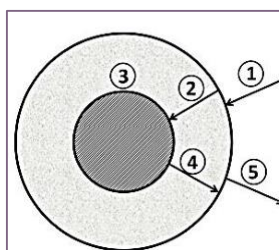
1.7. Etapas Fisicoquímicas del Proceso de calcinación

Las etapas físico-químicas de la calcinación describen el conjunto de fenómenos térmicos y moleculares que ocurren dentro de cada partícula de carbonato de calcio (CaCO_3) durante su descomposición en óxido de calcio CaO y la liberación de dióxido

de carbono CO_2 . Estas etapas combinan transferencia de calor, reacción química y transferencia de masa.

A continuación, se presenta un cuadro y un gráfico donde se detalla y clasifican cinco etapas de la calcinación de la piedra caliza.

Figura I-4: Dinámica de calcinación de la caliza



Fuente: Grupo Calidra, (2006).

Cuadro I-7: Fenómenos de la calcinación

Etapas	Nombre	Definición técnica	Fenómeno principal
1	Transferencia externa de calor	El calor se transmite por convección y radiación desde los gases calientes del horno hasta la superficie de la partícula.	Incremento de temperatura superficial.
2	Conducción interna	El calor fluye desde la superficie hacia el núcleo de la partícula a través de la zona parcialmente calcinada.	Propagación térmica interna.
3	Reacción endotérmica	En la interfaz cal-carbonato, el CaCO_3 se descompone en CaO y CO_2 , absorbiendo calor.	Ruptura de enlaces químicos.
4	Difusión interna del CO_2	El CO_2 generado migra desde el interior de la partícula hacia su superficie a través de los poros.	Transferencia de masa interna.
5	Liberación del CO_2	El CO_2 escapa de la superficie hacia el ambiente del horno.	Evacuación de gases y estabilización de la cal.

Fuente: Grupo Calibra, (2006).

1.8. Cinética de la reacción de la calcinación

Desde el enfoque cinético, la calcinación del óxido de calcio puede interpretarse como un proceso controlado por la descomposición térmica del carbonato de calcio, la cual progresa a través de un frente de reacción que avanza desde la superficie al interior de la partícula. En este esquema Fig I-4 , el fragmento de piedra caliza puede representarse como una esfera: el calor proveniente de la atmósfera del horno se transfiere inicialmente a la superficie externa y, posteriormente, se difunde gradualmente hacia el núcleo. En consecuencia, se forma una capa de óxido de calcio alrededor de un núcleo central de CaCO_3 aún sin descomponer, mientras que el frente de descomposición se desplaza hacia el centro a una velocidad determinada. Durante este proceso, el dióxido de carbono generado se libera al entorno a través de los poros originados en la matriz sólida.

Por otra parte, el análisis termodinámico permite establecer si una reacción es espontánea o no a una temperatura específica. A temperatura constante, este criterio se determina a partir de la variación de la energía libre de Gibbs (ΔG). Cuanto más negativo sea el valor de ΔG , mayor será el grado de espontaneidad del proceso y, en consecuencia, la reacción se desarrollará con mayor prioridad frente a otras posibles transformaciones químicas bajo las mismas condiciones.

1.9. Especificaciones del producto óxido de calcio

1.9.1 Óxido de calcio disponible

El término óxido de calcio disponible hace referencia a la fracción activa de CaO que puede reaccionar con el agua durante la etapa de hidratación, alcanzando un pH característico cercano a 12,6 (Janssens, 2007).

De acuerdo con la norma ASTM C25-96, el rango de calidad aceptable para el contenido de óxido de calcio disponible esta entre 81 % y 85 %. Sin embargo, durante el proceso de calcinación pueden presentarse pérdidas de esta fracción reactiva debido a la aplicación de temperaturas excesivas.

Este fenómeno, que genera una reducción en la reactividad del material, se conoce como recalcinación o requerido, y está asociado a la formación de fases menos aprovechables del CaO (Levenspiel, 2017).

1.9.2. Porcentaje de pérdidas por calcinación (%PPC)

La variable denominada pérdida por calcinación (PPC) expresa el porcentaje de material crudo, principalmente carbonato de calcio (CaCO_3), que permanece como residuo en la matriz de óxido de calcio (CaO) tras el proceso de calcinación.

Este valor refleja el grado de descomposición alcanzado en la reacción térmica y constituye un indicador crítico de la eficiencia del proceso.

Desde el punto de vista normativo, la ASTM C25-96 establece que el porcentaje máximo permitido de PPC en la cal viva debe ser del 5 %, ya que un valor superior indica una calcinación incompleta, disminuyendo la calidad del CaO obtenido.

Un exceso de carbonato residual no solo reduce la reactividad del producto final, sino que también limita su aplicación en procesos industriales que demandan una cal de alta pureza, como la producción de acero, la industria química y el tratamiento de aguas.

1.9.3. Velocidad de apagado de la cal

La reactividad de la cal se define como la velocidad de reacción del óxido de calcio al entrar en contacto con agua, manifestada en el incremento de la temperatura de la mezcla en función del tiempo. Esta característica resulta fundamental en múltiples aplicaciones industriales, particularmente en aquellos procesos que requieren una hidratación rápida y eficiente (Janssens, 2007).

El nivel de reactividad está directamente influenciado por las condiciones de calcinación: a mayor temperatura de operación y mayor tiempo de residencia térmica, se obtiene un producto con menor reactividad, debido a la sinterización de la matriz de CaO y la consecuente reducción de su superficie específica.

La posibilidad de controlar la reactividad depende por lo tanto del tipo de horno y en menor medida de las características de la piedra.

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materia prima para la obtención de óxido de calcio

La materia prima que se utilizó para la obtención de óxido de calcio, es la piedra Caliza adquirida del banco de materiales de una cantera ubicada en el municipio “El puente”, que pertenece a la provincia Méndez, del departamento de Tarija.

Esta zona se caracteriza por tener movimiento en el sector minero, pues la región cuenta con una planta de producción de cemento que pertenece a SOBOCE (Sociedad Boliviana de Cemento S.A.). En el lugar también hay varias plantas de producción artesanal de cal y explotación minera aurífera aluvial que sus actividades son desarrolladas en el río San Juan del Oro.

Figura II-1: Piedra caliza de la zona "El Puente"



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.2. Selección del método de obtención experimental del óxido de calcio

Como se vio en el Capítulo I, existen dos métodos para la obtención de óxido de calcio: calcinación convencional en horno rotario y calcinación en mufla eléctrica.

Para la selección del método se empleó el método de factores ponderados, el cual permite realizar un análisis cuantitativo y sistemático que compara de forma objetiva las alternativas disponibles. Este procedimiento consiste en asignar un peso relativo a cada criterio técnico, operativo, económico y ambiental, en función de su importancia dentro del proceso de obtención de óxido de calcio. Posteriormente, se evaluaron los métodos propuestos mediante una escala de calificación predeterminada de 1 a 10, donde los valores más altos corresponden a un mejor desempeño respecto al criterio evaluado (Peters, 2003).

Con esta metodología, se elaboraron tablas comparativas que incluyen las alternativas analizadas, los factores considerados y las calificaciones asignadas, permitiendo determinar de manera objetiva el método más adecuado en función de la puntuación ponderada final.

En la Tabla II-1 se establecieron las calificaciones ponderadas del uno al diez.

Tabla II-1: Escala de calificación

Calificación	Escala de Puntuación
Malo	1 – 2
Regular	3 – 4
Bueno	5 – 6
Muy bueno	7 – 8
Excelente	9 – 10

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En el Cuadro II-1 se observan los factores que se evaluarán en los métodos de calcinación y el porcentaje que tendrá cada factor.

Cuadro II-1: Factores a evaluar

Factor evaluado	Peso relativo (%)	Comentario del evaluador
Disponibilidad de equipamiento (laboratorio) y factibilidad de implementación	20	El laboratorio cuenta con mufla eléctrica operativa y calibrable; no se dispone de horno rotatorio, por lo que su implementación requeriría infraestructura externa y/o inversión no prevista.
Costo operativo y energético	25	Incluye consumo eléctrico/combustible, mantenimiento, insumos y personal. La mufla presenta menor costo y simplicidad de mantenimiento a escala laboratorio.
Control de proceso y reproducibilidad	20	Control fino de temperatura y trazabilidad de corridas. La mufla permite alta repetibilidad con lotes pequeños.
Calidad del CaO (pureza y re carbonatación mínima)	15	Capacidad de alcanzar $\geq 850\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ con enfriamiento controlado; la mufla facilita minimizar re carbonatación con manejo de crisoles y ventilación.
Tiempo de ciclo por lote	5	Duración total de calentamiento, sostén y enfriamiento.
Seguridad y operación	5	Riesgos térmicos/operativos y facilidad de operación. La mufla es de bajo riesgo relativo.
Impacto ambiental	5	Emisiones de CO_2 y consumos energéticos; en laboratorio, la mufla permite optimizar tiempos y energía.
Adecuación al objetivo aplicado (validar y aplicar tecnología)	5	Pertinencia del método para validar parámetros transferibles y replicables en contexto local.
Total	100	

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Tabla II-2 se ve la selección del método experimental de obtención de óxido de calcio a partir de piedra caliza, donde se califica los factores evaluados a cada método y se le asigna una puntuación del 1-10, para luego ser sumado y determinar cuál es el mejor método mediante el mayor porcentaje.

Dónde: A = Calificación.

Peso relativo (%) = Calificación del factor evaluado.

$B = (A \times \text{Peso relativo (\%)})/100\%$.

Tabla II-2: Selección del método experimental para la obtención de óxido de calcio

Factores evaluados	Peso relativo (%)	Mufla eléctrica		Horno rotatorio	
		A	B	A	B
Aplicabilidad del método y disponibilidad de equipamiento	20	10	2,0	3	0,6
Consumo energético y costos	25	9	2,25	6	1,5
Control de parámetros (temperatura y tiempo)	15	9	1,35	7	1,05
Calidad del CaO obtenido	15	9	1,35	8	1,2
Rendimiento del proceso	10	8	0,8	9	0,9
Seguridad y operación	5	9	0,45	7	0,35
Impacto ambiental	5	7	0,35	6	0,3
Adecuación al objetivo aplicado	5	9	0,45	7	0,35
Puntuación final	100		8,95		6,25

Fuente: Elaboración propia, 2025.

De acuerdo con la Tabla II-2, el método de calcinación controlada en mufla eléctrica obtuvo la mayor puntuación ponderada (8,95) en comparación con la calcinación convencional en horno rotatorio (6,25). La elección de este método se justifica en función de criterios técnicos, operativos y económicos, priorizando la disponibilidad de equipamiento en el laboratorio de operaciones unitarias, donde no se cuenta con horno rotatorio.

La mufla eléctrica permite un control más preciso de los parámetros críticos del proceso, como la temperatura y el tiempo de residencia, lo que favorece una mayor reproducibilidad experimental y la obtención de un óxido de calcio (CaO) de alta pureza. Adicionalmente, este método presenta menores costos operativos y energéticos, optimizando el uso de recursos para la investigación aplicada.

En este contexto, y considerando que el objetivo principal del estudio es validar y aplicar tecnología de calcinación a escala de laboratorio, se selecciona la calcinación controlada en mufla eléctrica como el método experimental más adecuado para la obtención de óxido de calcio a partir de piedra caliza.

2.3. Diseño Experimental

El diseño de experimentos constituye una herramienta clave en la investigación científica, facilitando la identificación de los factores y variables que influyen significativamente en la dinámica y desempeño de un proceso productivo.

2.3.1. Variables dependientes

Óxido de calcio total.

Óxido de calcio disponible.

Pérdidas por calcinación.

2.3.2. Variables independientes

Granulometría de la piedra Caliza

Temperatura de calcinación de la piedra Caliza

Tiempo de residencia de la piedra Caliza

2.3.3. Selección de las variables para el proceso de obtención de óxido de calcio

En este proyecto de investigación de obtención de óxido de calcio a partir de piedra caliza, se centrará la atención en la etapa de calcinación. En esta fase, es crucial controlar factores como la granulometría de la piedra caliza, la concentración de carbonato de calcio, el tiempo de residencia y la temperatura de calcinación.

Estos parámetros son determinantes para optimizar el rendimiento en la producción de cal (CaO), cuya calidad está vinculada a sus características específicas, tales como el contenido de óxido de calcio disponible, la reactividad, las pérdidas por calcinación, el óxido de calcio total.

En la Tabla II-3 se citan distintos proyectos de investigación realizados a escala laboratorio por varios autores para la obtención de óxido de calcio a partir de piedra caliza. Se observan en cada uno de ellos los parámetros óptimos utilizados en la etapa de calcinación necesarios para considerarlos como referencia en el desarrollo experimental de la obtención de óxido de calcio.

Cuadro II-2: Parámetros utilizados en la calcinación de diferentes autores

Variable	Rango	Autores
Granulometría de piedra caliza	1.5 - 2 pulgadas	Mohamad, H. & Chemco Systems (2002)
	½ - 3 pulgadas	Hernández, V., Arenas, A., Cárcamo, H., Conejeros, V., & Coloma G. (1995)
	1, 1.5, 2 y 3 pulgadas	Propuesta por tesisistas (nivel laboratorio) Gonzales , Ticona (2016)
Tiempo de Residencia	4, 6, 8 y 10 horas	Hernández, V., Arenas, A., Cárcamo, H., Conejeros, V., & Coloma G. (1995)
	4, 6, 8 y 10 horas	Propuesta por tesisistas (nivel laboratorio) Gonzales , Ticona (2016)
Temperatura de Calcinación	> 900 °C	Mohamad, H. & Chemco Systems (2002)
	900 - 1000 °C	Ing. María Gabriela Ruiz Hinojosa
	> 900 °C	Instruction Manual MAERZ
	> 900 °C	Manual de competencias de calcinación

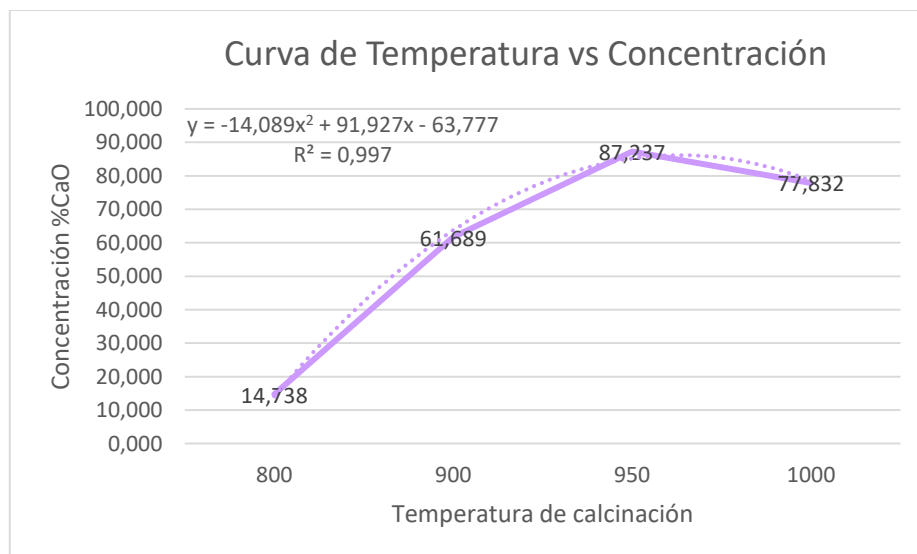
Fuente: Elaboración propia, 2025.

A partir de los datos mencionados en la Tabla II-3 se extraen los tres factores de mayor incidencia en la etapa de calcinación. Para determinar los valores mínimos y máximos que se emplearán en el diseño factorial, se realiza previamente una investigación sobre el rendimiento teórico de la concentración de óxido de calcio disponible.

Se realizan cinco pruebas preliminares procesadas a distintas temperaturas y misma granulometría de la piedra Caliza en la etapa de calcinación con el objetivo de direccionar los valores mínimos y máximos de cada factor.

Para una mayor referencia se construye una curva de temperatura vs concentración en % de óxido de calcio disponible.

Observando el comportamiento de la curva al incrementar la temperatura generalmente mejora la calcinación hasta cierto punto. A temperaturas excesivas pueden llevar a sinterización del óxido de calcio es decir perder porosidad y reactividad, lo que hace que el proceso sea menos efectivo.

Figura II-2: Curva de pruebas preliminares

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El comportamiento de la curva nos dice que entre 800 °C y 900 °C la concentración de CaO (%CaO) aumenta de manera pronunciada esto nos indica que en este rango se produce la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3).

Entre 900 °C y 950 °C se alcanza el máximo rendimiento, cercano al 85 % de CaO. Aquí la descomposición es prácticamente completa y se obtiene la mejor eficiencia en el proceso de calcinación.

De 950 °C a 1000 °C: Se observa una ligera disminución en la concentración de CaO.

Tabla II-3: Datos de concentración , pruebas preliminares

Datos			
T °C	V _{HCl} gast	W muestra	%CaO
800	14,9	2,822	14,738
900	62,1	2,810	61,689
950	87,6	2,803	87,237
1000	78,1	2,801	77,832

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.4. Diseño Factorial

El diseño factorial es primordial en la investigación científica, pues nos ayuda a identificar que variables afectan el desarrollo de un proceso productivo.

Los diseños factoriales son los más utilizados en los experimentos con dos o más factores, es decir, con dos o más variables independientes, las cuales serán analizadas al ser consideradas por el investigador como variables que afectan al proceso. Los valores en los que se puede trabajar con cada uno de los factores se les denomina niveles, es decir los niveles son el valor, puede ser cuantitativo o cualitativo, que puede tomar cada uno de los factores dentro del experimento (Fernández, 2020).

En un diseño factorial, cada uno de los niveles de cada factor independiente se combina con cada uno de los niveles de los demás, para así realizar todas las combinaciones posibles. Cada una de las combinaciones se convierte en una condición para el experimento. Esto produce que los experimentos sean más eficientes. Es decir, un diseño factorial estudia los efectos producidos por dos o más factores (variables independientes), con sus respectivos niveles al momento de las combinaciones que se realiza (Fernández, 2020).

El diseño factorial que se plantea para el presente proyecto de investigación es 2^k . Es decir, que se aplicará un diseño factorial 2^3 , en el cual se tienen 3 factores o variables independientes, 2 niveles y 2 repeticiones, y sobre esto se evalúa las variables respuestas.

El número de experimentos que se va a realizar se expresa en la siguiente ecuación:

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = (2^3) \times 2 = 16$$

Esto quiere decir que se van a realizar 8 experimentos, cada una de estas tendrá su replica que sumado nos dará 16 número de experimentos.

Los factores o variables que influyen más en el proceso fueron determinados según bibliografía consultada (cuadro II-2).

En la tabla II-3 se ven las variables y niveles que se tomaron en cuenta

Tabla II-4: Variables y niveles

Nombre de la variable	Símbolo	Unidades	Niveles	
			Bajo	Alto
Granulometría de piedra caliza	# Malla	"	3/4	1
Tiempo de residencia	Tr	h	8	10
Temperatura de calcinación	T°	°C	950	1000

Fuente: Elaboración propia, 2025

Los niveles son representados por (-1) y (+1) donde: (-1) representa el nivel bajo y (+1) el nivel alto de cada variable

Tabla II-5: Matriz de experimentos y plan de experimentos

Prueba	Matriz de experimentos			Plan de experimentación			
	Variable	variable	variable	Granulometría (")	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Rendimiento CaO disponible(%)
1	-1	-1	-1	3/4	8	950	Y1
2	+1	-1	-1	1	8	950	Y2
3	-1	+1	-1	3/4	10	950	Y3
4	+1	+1	-1	1	10	950	Y4
5	-1	-1	+1	3/4	8	1000	Y5
6	+1	-1	+1	1	8	1000	Y6
7	-1	+1	+1	3/4	10	1000	Y7
8	+1	+1	+1	1	10	1000	Y8

Fuente: Elaboración propia, 2025

A partir de esta etapa, se establece un sistema de codificación para cada muestra con el objetivo de asegurar su correcta identificación durante todo el proceso de obtención experimental de óxido de calcio de piedra Caliza. En la Tabla II-5 se encuentra el plan de experimentación para cada repetición a realizar.

**Tabla II-6: Codificación de los experimentos de obtención
de óxido de calcio**

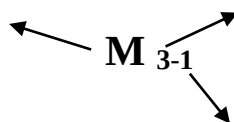
Muestra	Granulometría (")	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	
M₁₋₁	3/4	8	950	Replica 1
M₂₋₁	1	8	950	
M₃₋₁	3/4	10	950	
M₄₋₁	1	10	950	
M₅₋₁	3/4	8	1000	
M₆₋₁	1	8	1000	
M₇₋₁	3/4	10	1000	
M₈₋₁	1	10	1000	
M₁₋₂	3/4	8	950	Replica 2
M₂₋₂	1	8	950	
M₃₋₂	¾	10	950	
M₄₋₂	1	10	950	
M₅₋₂	3/4	8	1000	
M₆₋₂	1	8	1000	
M₇₋₂	3/4	10	1000	
M₈₋₂	1	10	1000	

Fuente: Elaboración propia, 2025

Descripción de la abreviación **M₃₋₁**:

M= muestra

3= Número de experimento



1= Número de replica

2.4.1. Especificación de las variables del diseño factorial

Las variables seleccionadas para la obtención de óxido de calcio (CaO) son: granulometría de la materia prima, tiempo de residencia en el horno y temperatura de calcinación.

La elección de estos parámetros se sustenta en el análisis de diferentes fuentes bibliográficas, que indican que estas variables tienen una influencia directa en la cinética de la descomposición térmica del carbonato de calcio (CaCO_3), así como en la pureza y reactividad del óxido obtenido (Janssens,2007).

Granulometría de la piedra Caliza

El control de la granulometría de la piedra caliza es un aspecto clave en la etapa de calcinación, ya que determina en gran medida la eficiencia del proceso y la calidad final del óxido de calcio (CaO).

Cuando las partículas son demasiado grandes, el calor no logra penetrar uniformemente hasta el núcleo, lo que ocasiona una calcinación incompleta y la presencia de material crudo, es decir, carbonato de calcio que no se descompone. Si las partículas son excesivamente finas, tienden a sobrecalentarse y a recalcinarse, lo que produce un CaO requemado con menor reactividad y, por ende, de menor calidad.

Tiempo de residencia de la piedra Caliza

El tiempo de retención en el horno durante la etapa de calcinación está directamente relacionado con dos factores principales: el tamaño de partícula de la piedra caliza y la temperatura de calcinación.

Entre ambos, la granulometría constituye el parámetro más crítico, ya que define la profundidad de penetración del calor y, por ende, la eficiencia de descomposición térmica del carbonato de calcio CaCO_3 .

Temperatura de calcinación de la piedra caliza

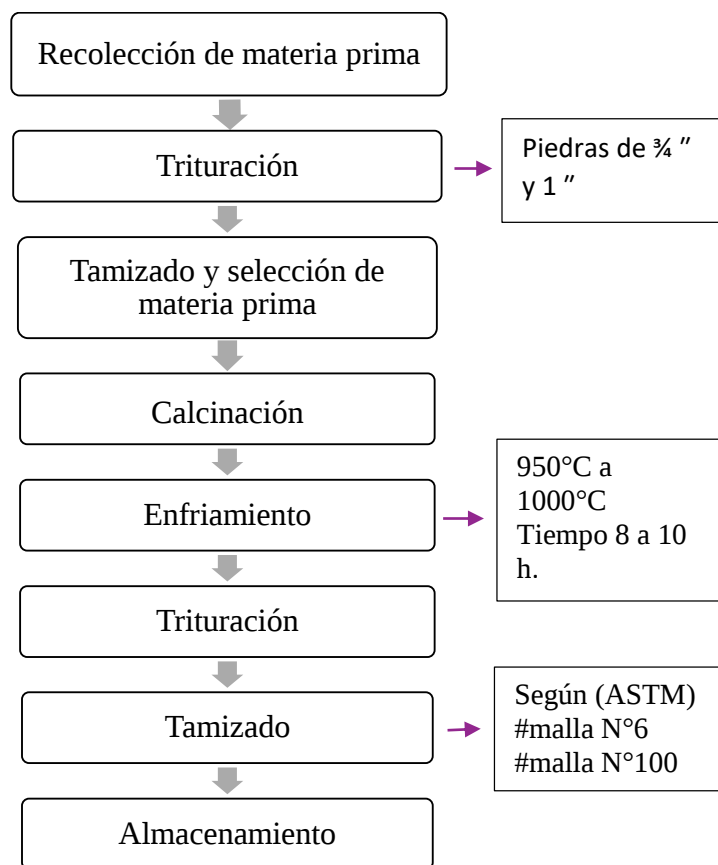
La temperatura de calcinación es un parámetro crítico en la obtención de óxido de calcio (CaO). Aunque la descomposición teórica del carbonato de calcio (CaCO_3) ocurre a unos 900 °C, en la práctica se requieren temperaturas ligeramente mayores, determinadas experimentalmente en función del tamaño de la partícula y las condiciones de la mufla.

El control de la temperatura de calcinación es esencial para obtener un óxido de calcio (CaO) de calidad, pues temperaturas moderadas y tiempos de residencia adecuados permiten una calcinación completa y uniforme, mientras que temperaturas excesivas provocan encogimiento, pérdida de porosidad y baja reactividad del CaO.

2.5. Descripción del método experimental para la obtención de óxido de calcio

En la figura II-2, se observan las etapas del método de activación química que se sigue durante la parte experimental para la obtención de óxido de calcio a partir de piedra Caliza, mostrando con claridad los parámetros que se toman en cuenta en cada etapa.

Figura II-3: Diagrama de bloques del método de obtención de óxido de calcio



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.1. Recolección de materia prima

La materia prima que se emplea en el estudio, es la piedra caliza recolectada de una cantera ubicada en el municipio “El Puente”, de la provincia Méndez, Tarija.

Se toma una muestra de 50 kg de un banco de materiales de piedra Caliza en el cual las rocas ya están trituradas con diámetros desde 5" hasta 2" aproximadamente en su mayoría. El montículo de rocas calizas tiene la capacidad de 4 toneladas de material, ya que proviene del descargo de una volqueta que tiene la dimensión mencionada.

Es necesario recalcar que después del vaciado de roca se homogeniza las calizas con ayuda de maquinaria para luego proceder al armado del cono de calizas.

Figura II-4: Cantera en la localidad "El Puente"



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-5: Piedra Caliza



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.2. Trituración de piedra Caliza

La piedra Caliza recolectada contaba con diámetros elevados para una posterior calcinación por lo que se procedió a triturar con ayuda de un combo hasta obtener diámetros de 2", 1" y $\frac{3}{4}$ ".

Posteriormente se pesó la muestra donde se marcó un peso de 48,5kg de piedra caliza.

2.5.3. Selección de la materia prima

La selección de la piedra Caliza se la realizó en el laboratorio de suelos de la carrera de Ingeniería Civil, ya que se cuenta con el equipo para realizar los métodos de cuarteo y selección de las rocas.

El método del cuarteo es empleado en su mayoría en el sector de minero, la técnica tiene el fin de reducir el tamaño de una muestra y obtener porciones representativas del material de modo que se preservan características importantes.

Figura II-6: Método del cuarteo aplicado en piedra caliza



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Procedimiento:

1. Limpiar las impurezas de las piedras calizas con ayuda de una brocha
2. Pesar la muestra 48,5 kg
3. Vaciar la muestra a un cuarteador mecánico
4. Colocar la muestra ya homogenizada en un contenedor

La siguiente parte de la selección de la materia prima es el tamizaje, para esta técnica se emplean los tamices que cumplen la normas ASTM.

Para realizar este método, se basó en la norma ASTM-C136, la cual emplea distintos tamices para la clasificación de material, en este caso la piedra Caliza.

Tabla II-7: Características de tamices

N° de Tamiz	Abertura Nominal (mm)
3"	75.0 mm
2½"	63.0 mm
2"	50.0 mm
1½"	37.5 mm
1"	25.0 mm
¾"	19.0 mm
½"	12.5 mm
⅜"	9.5 mm
N° 4	4.75 mm
N° 8	2.36 mm
N° 16	1.18 mm
N° 30	0.600 mm
N° 50	0.300 mm
N° 100	0.150 mm
N° 200	0.075 mm
Fondo	—

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura II-7: Técnica de Tamizaje



Fuente: Elaboración propia, 2025

Procedimiento

1. Seleccionar los tamices y verificar que los mismos estén limpios, secos.
2. Montar la columna de tamices. En este paso hay que colocar los tamices en orden descendentes es decir el de abertura mayor arriba y el más fino al final junto con la bandeja receptora.
3. Tamizar de forma manual, agitando la columna con movimientos horizontales y verticales para favorecer la separación durante un tiempo de 10 a 15 minutos.
4. Recolectar el material de cada tamiz y conservar en cada bolsa con la rotulación donde indique el número de granulometría.

2.5.4. Caracterización de la materia prima

La caracterización de la piedra caliza se la realiza en el laboratorio de la planta de cemento El Puente (SOBOCE), mediante un ensayo químico denominado análisis Químico de Cemento por Fluorescencia de Rayos X (XRF)- ISO 29581.

2.5.5. Calcinación de la piedra Caliza

Para la calcinación de la piedra Caliza se hace mediante lo recomendado por la bibliografía de Gonzales ,2016 y Mohamad, H. & Chemco Systems (2002).

Procedimiento

1. Acondicionar las cápsulas de arcilla mediante un tratamiento térmico que consiste en calcinar por 3 h a 900 °C, para eliminar humedad retenida, impurezas y verificar su resistencia. Posteriormente enfriar en un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente.
2. Pesar las cápsulas de arcilla en una balanza analítica y tarar.
3. Pesar la materia prima (piedra Caliza) 1000 g y con la granulometría indicada (3/4" o 1").
4. Prender la mufla eléctrica, y establecer la temperatura que se requiera ya sea 950°C o 1000°C.
5. Abrir la mufla e introducir las muestras con ayuda de las pinzas y esperar a que alcancé la temperatura deseada (950°C o 1000°C) y desde ese punto controlar el tiempo de residencia que se requiere para la calcinación.
6. Apagar la mufla una vez cumplido el tiempo de calcinación 8h a 10 h y esperar que disminuya la temperatura hasta 350°C a 300°C y recién proceder a retirar la muestra con ayuda de las pinzas a un desecador con el objetivo de tener un enfriamiento controlado, prevenir la humedad y mantener la condición de la muestra.

Figura II-8: Calcinación



Fuente: Elaboración propia, 2025

Figura II-9: Pesado materia prima: piedra Caliza



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5.7. Trituración de la muestra óxido de calcio

Para la preparación de la muestra de cal se trabaja de acuerdo a la Norma Boliviana 647 de cales, que establece los requisitos técnicos para la cal viva utilizada en procesos industriales y tiene como propósito garantizar la calidad y eficacia de la misma.

Procedimiento:

1. Pesar 0.5 kg de muestra de cal viva en una balanza analítica
2. Triturar la cal viva en un mortero hasta que el tamaño sea óptimo y facilite su paso por el tamiz N°6 US.
3. Mezclar toda la cal viva triturada y sacar una muestra de 50 g para posteriormente pulverizarla y que pase por el tamiz N°100 US.
4. Envasar en una bolsa con cierre hermético.

Figura II-10: Trituración



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.8. Tamizado

Esta técnica está guiada por la Norma Boliviana 647 de cales.

Procedimiento:

1. Pesar 0.5 kg de la muestra de cal viva previamente mezclado por un tamiz N° 6 US.
2. Pesar 50 g de la muestra pulverizada por el tamiz N° 100 US.

Figura II-11: Tamizaje



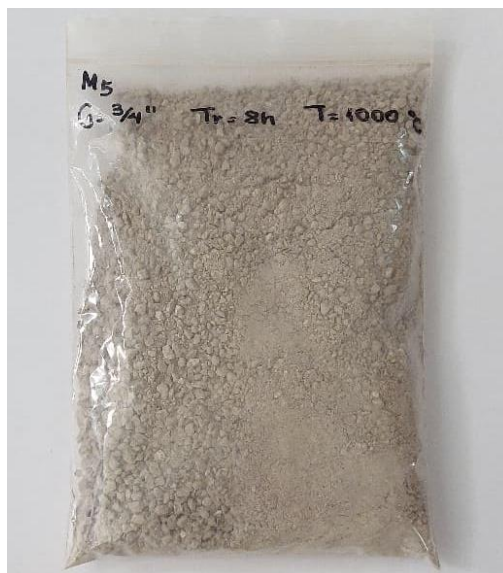
Fuente: Elaboración propia, 2025

2.5.9. Almacenamiento del óxido de calcio

Para el almacenamiento del óxido de calcio es fundamental que sea en envases de cierre hermético, pues la cal es higroscópica y tiende a re carbonatarse con el CO_2 del aire afectando su reactividad.

Se procedió a almacenar las muestras en bolsas con cierre tipo “zip-lock”.

Figura II-12: Almacenamiento



Fuente: Elaboración propia, 2025

2.6. Caracterización del Producto Obtenido

Para determinar la calidad del producto obtenido cal viva CaO se realizan dos análisis que se rigen con los lineamientos establecidos en la norma internacional ASTM C25-96, la cual especifica los métodos normalizados para determinar su composición química y calidad.

Esta norma define procedimientos para cuantificar el óxido de calcio disponible y la reactividad, son parámetros que nos permiten evaluar la pureza, la reactividad y la idoneidad de la cal viva.

Los análisis de la caracterización del óxido de calcio se realizaron por el autor del presente proyecto en el laboratorio CEANID de la UAJMS. Debido a que el laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera Ingeniería Química no cuenta con el material, reactivos y técnica.

2.6.1. Determinación del óxido de calcio disponible

Se determina el porcentaje de óxido de calcio disponible en la cal viva según el método ASTM C25-96 (Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime). El “índice de cal disponible” mide la fracción de cal viva que reacciona rápidamente en medio sacarado (solución de sacarosa ligeramente alcalinizada con fenolftaleína).

Preparación de Soluciones

- a) Preparación del anaranjado de metilo al 0.1%

Pesar 0,25 gr. Y agregarle 250 ml de alcohol etílico grado reactivo.

- b) Preparación del Ácido Clorhídrico HCl 1N.

1. Diluir 83 ml de Ácido Clorhídrico concentrado con agua bidestilada, aforando a un litro.
2. Se recomienda incrementar la preparación, guardando las proporciones, de manera que se prepare una cantidad de solución de HCl suficiente para un mes.
3. La solución no debe ser utilizada pasando los 30 días de haber sido estandarizada.

Figura II-13: Preparación del HCl



Fuente: Elaboración propia, 2025

c) Valoración de Ácido Clorhídrico 1N con Carbonato de Sodio

1. Pesar aproximadamente 20gr de Carbonato de Sodio Anhidro, colocarlo en un crisol y secarlo a 250°C por 4 horas en un horno de secado. Después enfriarlo en un desecador.
2. Disolver 2,2gr $\pm$ 0,1 mg de Carbonato de Sodio seco en 50 ml de agua destilada en un matraz de 500 ml.

Cálculo:

El cálculo de la Normalidad es como sigue:

$$\text{Normalidad del ácido} = (B \cdot 18,87) / C$$

Dónde: B = cantidad del Carbonato de Sodio utilizado, en gramos.

C = solución de HCl consumida, en mililitros.

Figura II-14: Valoración del HCl



Fuente: Elaboración propia, 2025

d) Preparación de la solución de azúcar

Preparación de la fenolftaleína como indicador (al 4%)

— Disolver 4 g de fenolftaleína seca con alcohol al 95%, aforar a 100 ml.

Preparación de la solución de azúcar (al 40%)

— Pesar 40 gramos de azúcar refinada y depositarla en un vaso de precipitado. Agregar 100 ml de agua destilada. Agitar la solución hasta que se disuelva el azúcar.

Neutralización

— Se añaden de 3 a 5 gotas del indicador fenolftaleína.
— Se mide el pH con potenciómetro y se ajusta hasta pH 8 con Hidróxido de Sodio NaOH 0,1 N.

Procedimiento:

1. Pesar en balanza analítica 2,800 +/- 0,05 g de muestra y transferir a un matraz Erlenmeyer de 500 ml
2. Agregar cuidadosamente por las paredes del matraz 100 +/- 5 ml de agua destilada en ebullición.
3. Tapar inmediatamente y colocar en el mechero o parrilla de calentamiento, dejar a ebullición durante un minuto aproximadamente.
4. Enfriar hasta temperatura ambiente.
5. Destapar y agregar 100 ml de solución de sacarosa, tapar nuevamente.
6. Colocar en parrilla de agitación durante 15 minutos aproximadamente y solo agitar cada 5 min cerca de 60 seg.
7. Quitar tapón y agregar de 4 a 5 gotas de indicador de fenolftaleína hasta observar color rosa intenso y lavar las paredes del matraz y debajo del tapón con agua destilada.
8. Titular durante agitación con ácido clorhídrico 1.0 N, hasta que la solución permanezca incolora hasta 3seg (recordar que es reversible). Después de este lapso anotar el gasto.

Cálculo:

$$\%CaO = \frac{V_{HCl} \times N_{HCl} \times 2.804}{W_{muestra}} \quad \text{Ec. 2. 1.}$$

Dónde:

V_{HCl} = Volumen gastado de HCl al titular (expresado en ml)

N_{HCl} = Normalidad del HCl

$W_{muestra}$ = Peso de la muestra (expresado en gramos)

2,804: = CaO en g, equivalente a 1 ml del ácido estándar x 100 o 1 ml de HCl estándar.

Figura II-15: Neutralización



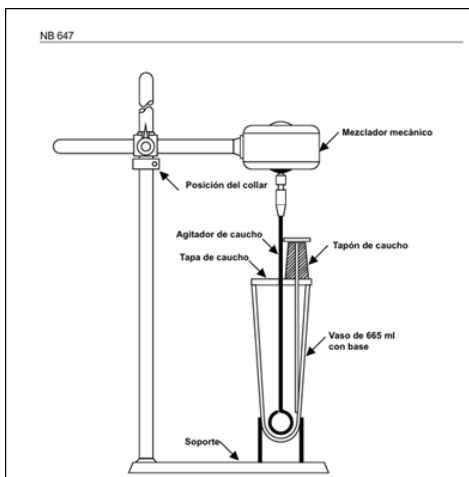
Fuente: Elaboración propia, 2025

2.6.2. Ensayo para determinar la velocidad de apagado del óxido de calcio

Este ensayo nos permite evaluar la reactividad de la cal, una característica directamente relacionada con la pureza del óxido de calcio y su proceso de obtención.

Se trabaja bajo los principios establecidos en la Norma Boliviana NB 647 para cales. Para la realización de este ensayo, se requiere un vaso Dewar; sin embargo, el laboratorio de Operaciones Unitarias no cuenta con dicho equipo y, dado que su adquisición representa un costo elevado, se optó por elaborar uno de forma artesanal, precautelando su función principal que es evitar la pérdida de calor.

Figura II-16: Detalles de equipo para el ensayo de velocidad de apagado del óxido de calcio



Fuente: IBNORCA. (2007).

Elaboración propia, 2025

Figura II-17: Construcción de calorímetro



Elaboración propia, 2025

Procedimiento:

Preparación del equipo

Encender el agitador mecánico, de acuerdo a la figura que indica la norma NB647.

Ajustar la velocidad del agitador a $400 \text{ rpm} \pm 50 \text{ rpm}$.

Mantener el equipo en funcionamiento durante al menos 5 minutos para estabilizar el sistema.

Preparación del agua

Medir 500 cm^3 de agua y ajustar su temperatura a 25°C .

Tomar 400 cm^3 de esta agua y verterlos cuidadosamente en el vaso Dewar.

Verificar que la temperatura del agua en la botella se mantenga en $25^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Iniciar la agitación a $400 \text{ rpm} \pm 50 \text{ rpm}$.

Preparación de la muestra

Con la cuchara de pesaje, pesar 100 g de muestra

Transferir rápidamente la muestra pesada al vaso de reacción, procurando que se deslice suavemente dentro del mismo.

Realizar esta operación en un tiempo máximo de 10 segundos.

Inicio del ensayo

Encender el cronómetro inmediatamente después de adicionar la muestra.

Colocar los empaques y el termómetro en su posición correspondiente para iniciar el registro de temperaturas.

Registro de temperatura

Realizar la primera lectura de la temperatura a los 30 segundos después de adicionar la muestra al vaso de reacción.

Continuar tomando lecturas cada 30 segundos durante 5 minutos.

Posteriormente, registrar la temperatura cada minuto durante 10 minutos o hasta que tres lecturas consecutivas muestren una variación menor a $0,5^\circ\text{C}$.

CAPÍTULO III

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Resultado de la Caracterización de la piedra Caliza

El ensayo que se usa para la caracterización de la piedra Caliza se realizó en el laboratorio de la fábrica de cemento El Puente (SOBOCE), es un ensayo químico denominado Análisis Químico de Cemento por Fluorescencia de Rayos X (XRF)- ISO 29581.

La norma ISO 29581 describe un método basado en el desempeño para el análisis químico de cementos mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF). El procedimiento permite determinar con precisión el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Mn_2O_3 , SrO , Cl y Br , y puede aplicarse también a otros elementos relevantes, siempre que se establezcan calibraciones adecuada (ISO 29581-2, 2010).

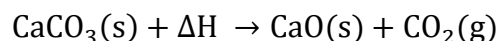
Tabla III-1 Composición química de la muestra de caliza mediante XRF

Componente	Formula Química	Unidad	Norma Aplicada	Resultado (%)
Dióxido de silicio	SiO_2	%	NTP-ISO 29581-2	2,79
Óxido de aluminio	Al_2O_3	%	NTP-ISO 29581-2	0,40
Óxido férrico	Fe_2O_3	%	NTP-ISO 29581-2	0,36
Óxido de calcio	CaO	%	NTP-ISO 29581-2	50,80
Óxido de magnesio	MgO	%	NTP-ISO 29581-2	0,83
Óxido de potasio	K_2O	%	NTP-ISO 29581-2	0,00
Óxido de sodio	Na_2O	%	NTP-ISO 29581-2	0,15
Trióxido de azufre	SO_3	%	NTP-ISO 29581-2	0,04
Pérdida por calcinación	LOI	%	NB 061	42,43

Fuente: Laboratorio de la fábrica de cemento El puente ,(2025).

3.1.1. Determinación de la pureza de CaCO_3

Para la determinación la pureza del carbonato de calcio es mediante la determinación del contenido de CaO basandose en tres fundamentos químicos esenciales: la estequiometría de la reacción de descomposición del CaCO_3 , la ley de proporciones definidas y la conservación de la materia, permitiendo así obtener un indicador confiable de la calidad y pureza de la caliza.



En esta reacción la transformación no indica que un mol de carbonato de calcio produce un mol de óxido de calcio y un mol de dióxido de carbono, manteniendo así una relación molar 1:1 entre CaCO_3 y CaO .

De acuerdo con la ley de las proporciones definidas (Proust), todo compuesto presenta una proporción fija y constante entre sus elementos constituyentes.

En este caso:

La masa molar del CaCO_3 es 100 g/mol.

La masa molar del CaO es 56 g/mol.

Calculo del factor de conversión

$$f = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CaO}}} \quad \text{Ec. 3. 1.}$$

$$f = \frac{100 \text{ g}}{56 \text{ g}} = 1,7857$$

Esto significa que 1 gramo de CaO equivale a 1,7857 gramos de CaCO_3 .

Entonces los resultados de la muestra nos indican que tiene 50,80 % CaO para encontrar la pureza multiplicamos por el factor de conversión:

$$\text{Pureza de caliza} = 50,80 \% \times 1,7857 = 90,71\%$$

El porcentaje de la pureza de la piedra Caliza es de 90, 71 %, resultado que según la bibliografía del Manual de Cemento Duda, la roca se clasifica como una caliza margosa y calcárea (Cuadro I-1 Clasificación de piedras calizas). Este porcentaje de pureza es satisfactorio puesto que indica que la piedra caliza presenta un alto contenido de carbonato de calcio, lo que es ideal para procesos industriales como la calcinación, siendo favorable para la eficiencia y rendimiento del proceso de obtención de óxido de calcio.

3.2. Resultados de la determinación del óxido de calcio disponible

El método ASTM C25-96, utilizado para la determinación del porcentaje de óxido de calcio (CaO) disponible en la cal viva, se basa en una técnica titulométrica que mide la fracción de cal viva que reacciona rápidamente en una solución de sacarosa ligeramente alcalina. El proceso está descrito en el Capítulo II punto 2.6.1 del presente texto posteriormente se cuantifica y se reporta los resultados de acuerdo a los cálculos que indica la norma ASTM C25-96, con el visto bueno del encargado del área del laboratorio CEANID.

3.2.1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de determinación de óxido de calcio

Para la realización del cálculo del óxido de calcio se usa la siguiente ecuación

$$\%CaO = \frac{V_{HCl} \times N_{HCl} \times 2.804}{W_{muestra}} \quad \text{Ec. 3. 2.}$$

En la siguiente tabla, se muestra los resultados de concentración de oxido disponible de la muestra.

Tabla III-2: Resultados del óxido de calcio disponible

Datos y resultados			
Nº M	V_{HCl} gast (ml)	W muestra (g)	%CaO
M 1-1	86,1	2,801	85,792
M 2-1	94	2,8009	93,681
M 3-1	85	2,8012	84,702
M 4-1	88	2,801	77,701
M 5-1	85,6	2,8005	77,321
M 6-1	87	2,803	86,640
M 7-1	82,4	2,8005	82,132
M 8-1	84	2,804	83,622
M 1-2	86,1	2,8014	87,792
M 2-2	84,5	2,8008	91,221
M 2-3	82,2	2,801	81,931
M 2-4	77	2,8007	76,744
M 2-5	79	2,8005	78,743
M 2-6	80	2,8015	79,711
M 2-7	81	2,8006	80,733
M 2-8	82	2,802	81,689

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Según la norma ASTM C25-96 el número de ml de la solución de ácido patrón empleada en procedimiento equivale al % de óxido de calcio disponible en la muestra.

Los resultados obtenidos que se muestran en la tabla indican un contenido de CaO en el rango de 76.744% a 94.216%, lo cual es indicativo de una cal viva con buena pureza y alta reactividad, fundamental en procesos industriales que requieren un alto rendimiento del CaO en reacciones químicas.

En cuanto a la variabilidad de los resultados, las muestras presentan una ligera variabilidad en los porcentajes de CaO, con algunas muestras alcanzando el límite

inferior del rango aceptable 76%, mientras que otras muestran valores cercanos al 94%, lo que refleja una distribución homogénea en cuanto a la pureza del CaO, pero con pequeñas desviaciones que podrían estar asociadas a las características de la cal debido a su proceso de obtención debido a que durante la calcinación se trabajó a diferentes granulometría , temperatura y tiempo de residencia.

Respecto al cumplimiento de normativa, los estándares de la norma ASTM C25-96, la cal viva debe mostrar una pureza mínima de 80% de CaO para garantizar su efectividad en aplicaciones industriales.

La mayoría de las muestras analizadas cumplen con este umbral, asegurando su aptitud para, tratamiento de aguas y producción de materiales de construcción, donde se requiere alta reactividad del CaO, en el Cuadro I-4 clasificación de tipos de cal de acuerdo a su pureza, nos indica los usos que se puede dar a la cal y las normas que lo certifican.

3.3. Resultados del Ensayo para determinar la velocidad de apagado del óxido de calcio

Este ensayo determina la clasificación del óxido de calcio en función de su reactividad, la cual se mide a partir del ensayo de hidratación. El análisis evalúa el incremento de temperatura que se genera cuando la cal entra en contacto con el agua, parámetro que refleja tanto la pureza química (contenido de CaO disponible) como la calidad del proceso de calcinación durante su fabricación (ASTM C110, 2000).

Para este ensayo los resultados se expresan en una gráfica de tiempo contra temperatura de apagado donde la temperatura de apagado corresponde a la ordenada y el tiempo en min a la abcisa, incremento de temperatura, en tres (3) min, incremento total de la temperatura y el tiempo total de apagado activo.

Cuadro II-1: Datos de precisión, tipo de cal

Material	Tiempo de ensayo	Rango de aumento de temperatura
Alto contenido de calcio	30 s	12.3 a 44.4 °C
Alto contenido de calcio	3 min	32.1 a 56.1 °C
Dolomítico	30 s	3.6 a 12.0 °C
Dolomítico	3 min	21.2 a 36.4 °C

Fuente: ASTM E691-20, (2020).

3.3.1. Resultados y gráficas de tiempo contra temperatura

En el marco del estudio de la reactividad térmica de la cal viva, la gráfica de tiempo vs. temperatura juega un papel fundamental en la evaluación de su comportamiento térmico durante el proceso de reacción con agua. Esta gráfica se construye colocando el tiempo en el eje horizontal (abcisa) y la temperatura en el eje vertical (ordenada), lo que permite observar cómo varía la temperatura de la muestra a lo largo del tiempo.

El objetivo principal de esta gráfica es representar la evolución térmica de la cal cuando entra en contacto con el agua, proporcionando información esencial para determinar su reactividad.

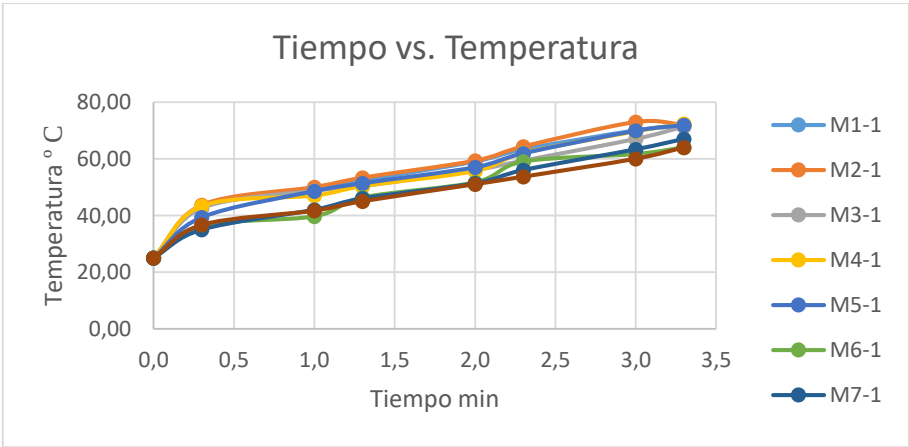
A continuación, se muestra los datos promedios de los 16 ensayos realizados.

Tabla III-3: Registro de la evolución térmica de muestras de óxido de calcio

TIEMPO (min)	TEMPERATURA (° C)							
	M1-1	M2-1	M3-1	M4-1	M5-1	M 6-1	M7-1	M8-1
0,0	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
0,3	42,67	43,67	42,67	43,33	39,33	36,33	35,00	36,67
1,0	49,00	50,00	48,67	47,00	48,56	39,67	42,00	41,67
1,3	52,33	53,33	50,33	50,33	51,33	46,33	46,00	45,00
2,0	59,00	59,33	56,00	55,67	57,00	51,67	51,33	51,00
2,3	63,33	64,33	59,33	62,00	61,89	59,00	56,00	53,67
3,0	70,00	73,00	67,00	69,67	69,89	61,67	63,33	60,00
3,3	71,67	72,00	71,33	72,33	71,89	64,00	67,00	64,00
4,0	71,33	71,00	71,00	71,00	71,00	70,00	69,67	69,67
4,3	69,67	69,33	69,67	69,67	69,56	70,00	68,67	69,00
5,0	68,67	67,33	68,67	67,33	67,78	68,67	66,33	68,00
6,0	66,33	65,33	65,67	65,67	65,56	66,67	64,67	66,33
7,0	64,67	64,67	65,33	65,00	67,00	63,66	64,33	63,67
8,0	64,33	64,33	65,00	64,67	66,66	63,33	64,33	63,66
9,0	64,00	63,67	64,33	63,67	65,00	63,33	63,67	63,33
10,0	63,00	61,67	62,00	60,00	62,33	62,66	59,67	62,00

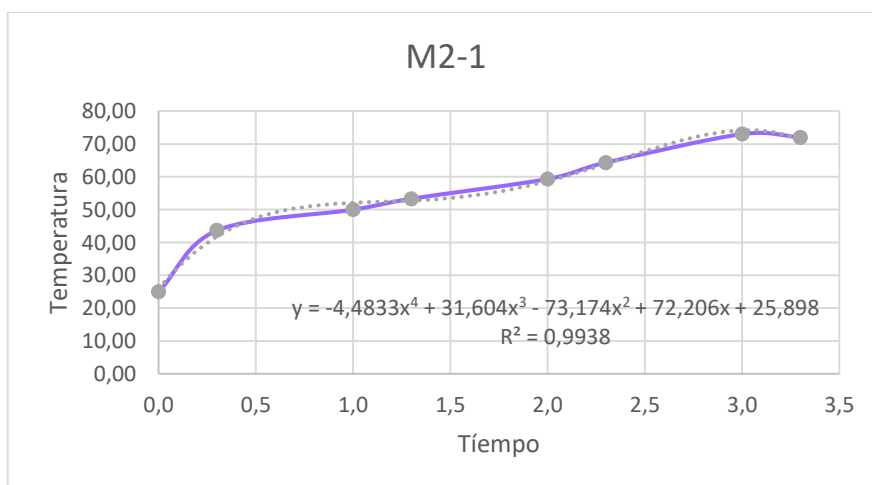
Fuente: Elaboración propia, 2025

Gráfica III-1: Curvas de evolución térmica de cal del ensayo de velocidad de apagado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Gráfica III-2: Curva de mayor incremento de temperatura durante el ensayo de velocidad apagado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

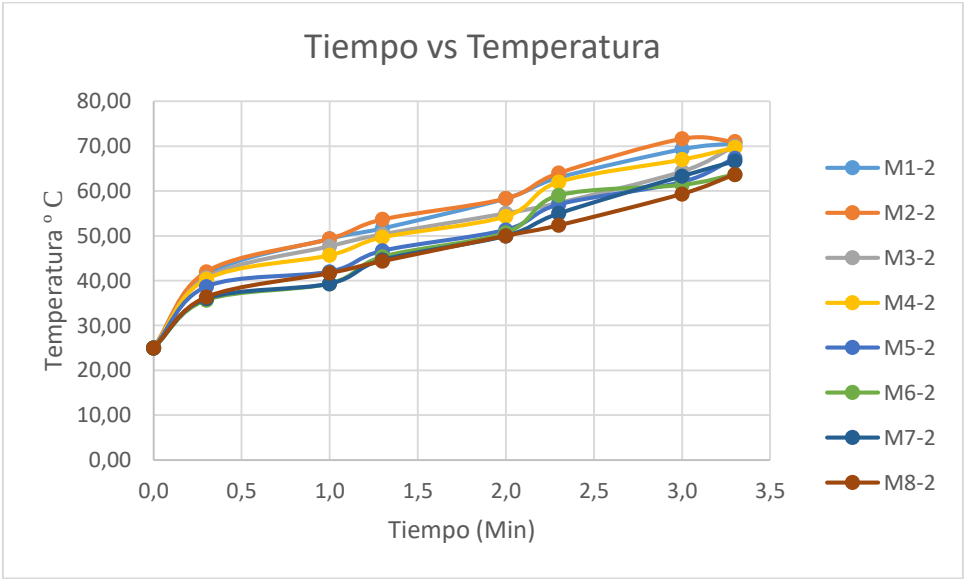
Tabla III-4: Registro de réplicas de la evolución térmica de muestras de óxido de calcio

TIEMPO (min)	TEMPERATURA (° C)							
	M1-1	M2-1	M3-1	M4-1	M5-1	M 6-1	M7-1	M8-1
0,0	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
0,3	42,67	43,67	42,67	43,33	38,67	36,33	35,00	36,67
1,0	49,00	50,00	48,67	47,00	42,00	39,67	42,00	41,67
1,3	52,33	53,33	50,33	50,33	46,67	46,33	46,00	45,00
2,0	59,00	59,33	56,00	55,67	51,33	51,67	51,33	51,00
2,3	63,33	64,33	59,33	62,00	57,00	59,00	56,00	53,67
3,0	70,00	73,00	67,00	69,67	62,00	61,67	63,33	60,00
3,3	71,67	72,00	71,33	72,33	67,33	64,00	67,00	64,00
4,0	71,33	71,00	71,00	71,00	69,33	70,00	69,67	69,67
4,3	69,67	69,33	69,67	69,67	69,33	70,00	68,67	69,00
5,0	68,67	67,33	68,67	67,33	67,67	68,67	66,33	68,00

6,0	66,33	65,33	65,67	65,67	67,67	66,67	64,67	66,33
7,0	64,67	64,67	65,33	65,00	67,33	63,66	64,33	63,67
8,0	64,33	64,33	65,00	64,67	67,00	63,33	64,33	63,66
9,0	64,00	63,67	64,33	63,67	63,67	63,33	63,67	63,33
10,0	63,00	61,67	62,00	60,00	61,00	62,66	59,67	62,00

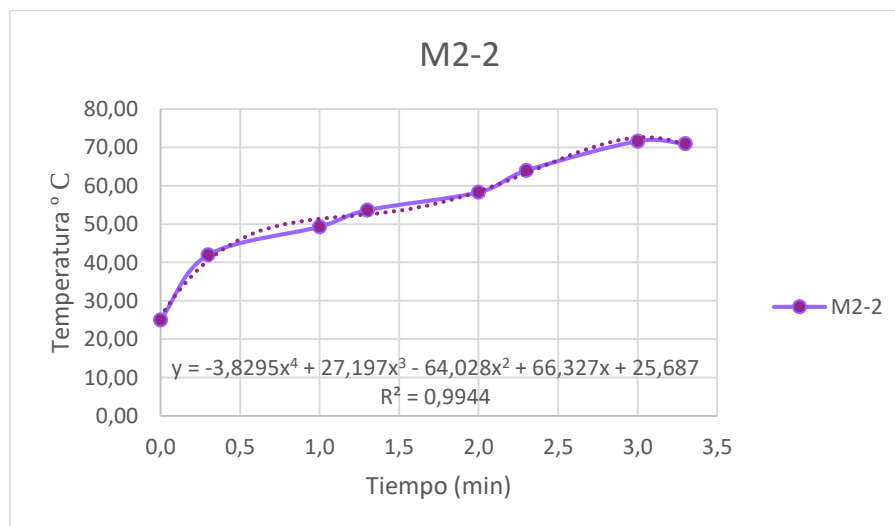
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Gráfica III-3: Curvas de réplicas de evolución térmica de cal del ensayo de velocidad de apagado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Gráfica III-4: Curva de mayor incremento de temperatura durante el ensayo de velocidad de apagado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los ensayos de velocidad de apagado realizados conforme a la Norma Boliviana NB 647 permitieron evaluar la reactividad de 16 muestras de cal viva.

La reacción de hidratación del óxido de calcio con agua es de carácter exotérmico y se refleja en el aumento progresivo de la temperatura en función del tiempo.

Las curvas muestran un patrón similar: un ascenso rápido de la temperatura en los primeros 30 segundos y una posterior elevación sostenida hasta los 3,5 minutos de ensayo. Las temperaturas finales alcanzan valores cercanos a **65–75 °C**, lo que evidencia una liberación energética significativa y confirma la presencia de una cal de buena calidad reactiva.

No obstante, existen diferencias en la cinética de hidratación:

En la primera serie de ensayos (Gráfico III-1) se observa un incremento uniforme de temperatura en todos los ensayos, alcanzando valores finales cercanos a **70–75 °C**.

Muestras M2-1 y M5-1 presentan pendientes más pronunciadas, alcanzando temperaturas más altas en menor tiempo, lo cual indica alta reactividad inicial y mayor disponibilidad de CaO.

Muestras M6-1 y M7-1, muestran un ascenso más gradual, lo que sugiere reactividad moderada posiblemente asociada a la presencia de MgO u otros compuestos inertes.

El resto de las muestras M1-1, M3-1, M4-1 mantienen un comportamiento intermedio, con un apagado uniforme y estable, sin desviaciones abruptas.

En la segunda gráfica, Gráfica III-3 se evidencian comportamientos similares, con ascensos rápidos en los primeros 30 segundos y estabilización progresiva hasta los 3,5 minutos. Las temperaturas finales se ubican también en un rango de **65–72 °C**.

Muestras M2-2, M4-2 y M8-2: destacan por su elevada pendiente inicial y mayores temperaturas alcanzadas, clasificándolas como de alta reactividad.

Muestras M1-2 y M7-2: mantienen un perfil más lento, con curvas menos inclinadas, lo que las ubica en el grupo de reactividad moderada.

Las demás muestras presentan un comportamiento homogéneo y estable, situándose en la categoría de reactividad intermedia.

En conclusión, todas las muestras ensayadas cumplen con el comportamiento esperado según la NB 647, alcanzando temperaturas finales que confirman su adecuada reactividad.

Las curvas permiten diferenciar tres categorías: alta reactividad; con rápido ascenso térmico, reactividad intermedia; curvas equilibradas y reactividad moderada; con pendientes suaves.

Esta variabilidad puede estar influida por la composición química (contenido de CaO frente a MgO), la granulometría de la muestra y las condiciones de calcinación durante la producción.

3.3.2. Incremento de la temperatura en 3 minutos

El objetivo de este cálculo es determinar el incremento de temperatura producido en los primeros 3 minutos de la reacción, tras la adición de la muestra en un vaso de reacción agitado a 400 rpm. Este cálculo es fundamental para evaluar el comportamiento térmico y la eficiencia de la reacción química bajo las condiciones experimentales establecidas.

Tabla III-5: Resultados del incremento de la temperatura en 3 minutos

Resultados			
Muestra	T inicial	T final	Δ_3 total
M1-1	25	70,00	45,00
M2-1	25	73,00	48,00
M3-1	25	67,00	42,00
M4-1	25	69,67	44,67
M5-1	25	69,89	44,89
M6-1	25	61,67	36,67
M7-1	25	63,33	38,33
M8-1	25	60,00	35,00
M1-2	25	69,33	44,33
M2-2	25	71,67	46,67
M2-3	25	64,33	39,33
M2-4	25	67,00	42,00
M2-5	25	62,00	37,00
M2-6	25	61,33	36,33
M2-7	25	63,33	38,33
M2-8	25	60,00	35,00

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En ambas series con 16 ensayos las curvas muestran un ascenso rápido en los primeros

30 - 60 s y una elevación sostenida hasta ~3–3,5 min, con temperaturas finales típicas entre 60 y 73 °C.

Los ΔT_3 min reportados se ubican principalmente entre 35 y 48 °C, destacando como comportamientos óptimos M2-1 = 48,00 °C y M2-2 = 46,67 °C, que reflejan alta reactividad.

3.3.3. Tiempo total de apagado activo

El tiempo total de apagado activo se considera desde el momento en que se toma la primera de las tres últimas lecturas con una variación de temperatura menor de 0,5°C hasta que se haya estabilizado.

Este tiempo de apagado se utiliza para analizar la tasa de enfriamiento de la reacción y es importante para entender cómo la reacción química ha alcanzado un equilibrio térmico o ha dejado de generar calor de manera significativa.

Según la norma ASTM C110-20, la clasificación de la reactividad de la cal se realiza de la siguiente manera

Cuadro III-2: Clasificación de la reactividad de la cal

Clasificación	Tiempo Total de Apagado Activo	Incremento de Temperatura a los 3 Minutos
Alta Reactividad	≤ 3 minutos	≥ 40°C
Reactividad Media	3.1 – 6 minutos	30 – 39°C
Baja Reactividad	> 6 minutos	< 30°C

Fuente: ASTM C 110-20 , (2016).

Para expresar los resultados del tiempo total de apagado se realizan los cálculos guiados por la norma de cales, se empleando la siguiente formula.

$$T_{\text{total de apagado}} = T_f - T_i \quad \text{Ec. 3.3.}$$

T_i : es el tiempo cuando se toma la primera de las últimas tres lecturas con una variación de temperatura de menos de 0,5°C.

T_f : es el tiempo en el que la temperatura se estabiliza y no varía significativamente, con las tres últimas lecturas consecutivas mostrando cambios menores a 0.5°C .

Tabla III-6: Resultados de tiempo total de apagado activo

Muestra	T inicio	T final	ΔT total
M1-1	7,00	10,0	3,0
M2-1	7,00	10,0	3,0
M3-1	6,00	9,0	3,0
M4-1	6,00	9,0	3,0
M5-1	6,00	9,0	3,0
M6-1	6,00	9,0	3,0
M7-1	6,00	9,0	3,0
M8-1	6,00	9,0	3,0
M1-2	7,00	10,0	3,0
M2-2	6,00	9,0	3,0
M2-3	6,00	9,0	3,0
M2-4	6,00	9,0	3,0
M2-5	5,00	8,0	3,0
M2-6	6,00	9,0	3,0
M2-7	6,00	9,0	3,0
M2-8	6,00	9,0	3,0

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los resultados de las muestras ensayadas reflejan que todas alcanzan un tiempo total de apagado activo de 3 minutos, con temperaturas iniciales entre 5 y 7°C y finales entre 8 y 10°C . La uniformidad de los valores refleja un comportamiento muy constante en el proceso de hidratación.

De acuerdo con la clasificación de reactividad, un tiempo de apagado de 3 minutos corresponde a la categoría de “Alta Reactividad”, siempre que el incremento de temperatura a los 3 minutos sea igual o superior a 40°C .

Aunque en esta serie de datos no se detallan los incrementos térmicos, el tiempo registrado por sí solo indica que la cal presenta una cinética de apagado rápida, lo cual es un signo de buena calidad y elevada disponibilidad de óxido de calcio (CaO).

3.4. Cuantificación de la muestra separada de óxido de calcio por ensayo de (XRF)- ISO 29581.

El análisis utilizado para la caracterización de la mejor muestra M2-1 de óxido de calcio se llevó a cabo en el laboratorio de la planta El Puente de SOBOCE, aplicando un ensayo químico denominado Análisis Químico de Cemento mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF), conforme a la norma ISO 29581.

La técnica instrumental empleada para cuantificar la composición química, funciona irradiando la muestra con rayos X y midiendo la radiación característica emitida por cada elemento.

Tabla III-7 Resultados de óxido de calcio

Componente	Unidad	Método	Resultado (%)
SiO₂ (Dióxido de silicio)	%	NTP-ISO 29581-2	1,14
Al₂O₃ (Óxido de aluminio)	%	NTP-ISO 29581-2	0,001
Fe₂O₃ (Óxido férrico)	%	NTP-ISO 29581-2	0,20
CaO (Óxido de calcio)	%	NTP-ISO 29581-2	95,03
MgO (Óxido de magnesio)	%	NTP-ISO 29581-2	2,06
K₂O (Óxido de potasio)	%	NTP-ISO 29581-2	0,03
Na₂O (Óxido de sodio)	%	NTP-ISO 29581-2	0,03
SO₃(Trióxido de azufre)	%	NTP-ISO 29581-2	0,06
LOI (Pérdidas por calcinación)	%	NB 061	0,34

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El elevado contenido de óxido de calcio confirma que se trata de una cal de alta pureza. En términos industriales, valores por encima del 90% se consideran óptimos para aplicaciones metalúrgicas, de tratamiento de aguas y procesos químicos.

El SiO_2 : con 1,14%, Fe_2O_3 : con 0,20% y Al_2O_3 : con 0,001% están en niveles bajos. Esto indica que la caliza original era de buena calidad, con mínima presencia de minerales silicatados o arcillosos.

Estos valores bajos son favorables porque reducen la formación de fases inertes durante la calcinación, aumentando la reactividad del CaO .

3.5. Resultados de óxido de calcio requemado y % de crudo

Los requemados se calculan restando el porcentaje de óxido de calcio total de la suma del porcentaje de óxido de calcio disponible y el porcentaje de los crudos. Este parámetro permite identificar la fracción de cal que ha sido sobrecalcinada y, por tanto, ha perdido reactividad. Asimismo, la relación estequiométrica entre CaO y CO_2 se obtiene a partir de sus pesos moleculares.

Peso molecular de CaO / Peso molecular del CO_2 $56/44=1.27$

$$\% \text{ de crudo} = 1,27 * \% \text{PPC} \quad \text{Ec.3.4}$$

$$\% \text{ de crudo} = 1,27 * 0,34\%$$

$$\% \text{ de crudo} = 0,4318 \%$$

$$\text{CaO}_{\text{requemado}} = \text{CaO}_{\text{total}} - (\text{CaO}_{\text{disponible}} + \% \text{ crudo}) \quad \text{Ec. 3.5}$$

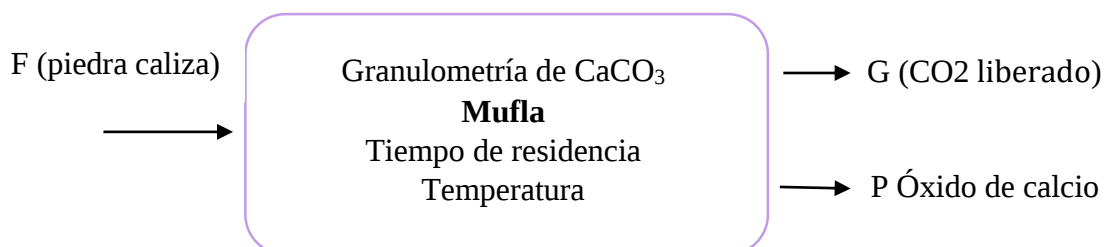
$$\text{CaO}_{\text{requemado}} = 95,03 \% - (93,681\% + 0,4318\%)$$

$$\text{CaO}_{\text{requemado}} = 0,9172\%$$

3.6. Balance de Materia y Energía

En este punto se presentan los cálculos del balance de masa y energía en un sistema de calcinación en una mufla. Se efectuó el balance de masa a partir de la alimentación de piedra caliza al horno, obteniéndose como producto principal óxido de calcio (cal viva), con la consecuente liberación de dióxido de carbono (CO_2) al medio. Este análisis permite determinar de manera cuantitativa el rendimiento del proceso de calcinación. Posteriormente, se desarrolla el balance de energía, orientado a evaluar el

comportamiento térmico del sistema y a establecer la demanda energética necesaria para la transformación del carbonato de calcio en cal viva bajo las condiciones operativas del horno mufla.

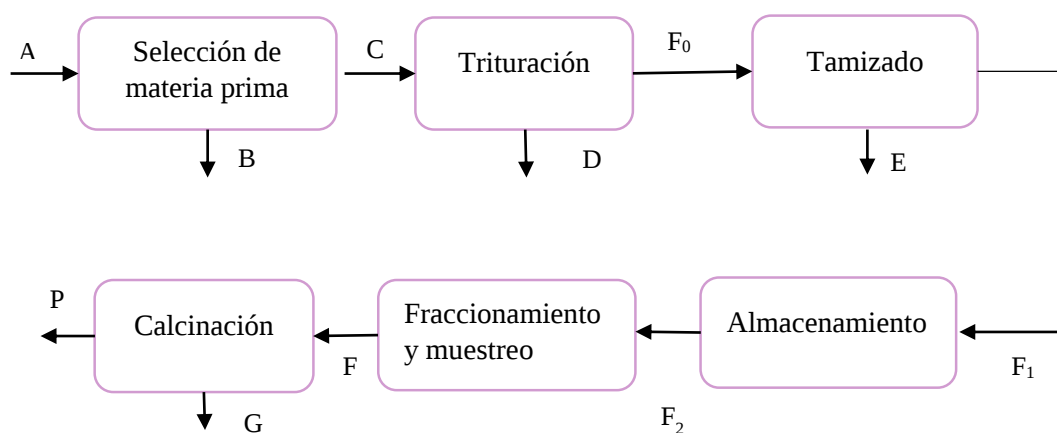


Los balances de materia y energía se realizan según los resultados obtenidos durante la parte experimental del proyecto.

3.6.1. Balance de materia del proceso tecnológico experimental

Se realiza el balance de materia del proceso de obtención de óxido de calcio utilizando la muestra con mayor rendimiento, correspondiente a M2. Esta muestra presenta una concentración de óxido de calcio disponible de 93,681 %, una granulometría de 1", un tiempo de residencia de 8 h y una temperatura de operación de 950 °C.

Figura III-1: Diagrama de bloques para el proceso experimental de la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Cuadro III-3 se muestran las especificaciones de las corrientes del diagrama de bloques.

Cuadro III-3: Corrientes de proceso

Corriente	Especificación
A	CaCO ₃ con impurezas
B	Impureza
C	CaCO ₃ sin impurezas
D	Pérdidas partículas suspendidas
E	Pérdidas partículas suspendidas
F₀	Piedra Caliza sin clasificar
F₁	Piedra Caliza clasificada
F₂	Piedra Caliza con granulometría seleccionada
F	Fracción de muestra piedra Caliza
G	Gas CO ₂ liberado
P	Sólido ,óxido de calcio en trozo

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En el cuadro III-4: se muestran las abreviaturas de los componentes que se utilizaron.

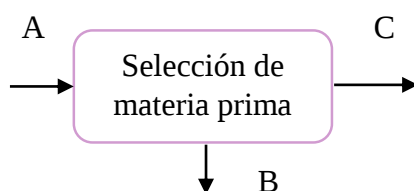
Cuadro III-4: Nomenclatura de fórmulas química

Fórmula Química	Nomenclatura Sistemática
CaCO₃	Carbonato de calcio
CO₂	Dióxido de carbono
CO	Óxido de calcio

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para más detalle, a continuación, se presenta el balance de materia de cada etapa del proceso para la obtención de óxido de calcio por calcinación a escala laboratorio.

3.6.1.1. Etapa de selección de materia prima



A=CaCO₃ con impurezas

B= Impureza

C=CaCO₃ sin impurezas

Balance global:

Entrada = Salida + Pérdidas

$$A = B + C$$

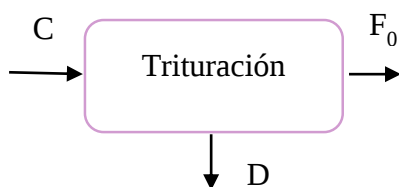
Ec. 3. 6.

$$C = A - B$$

$$C = 50\text{kg} - 1,5\text{kg}$$

$$C = 48,5 \text{ kg}$$

3.6.1.2. Etapa de trituración



C=(CaCO₃) sin impurezas

F₀= Piedra Caliza sin clasificar

E= Perdidas partículas suspendidas

Balance global:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Pérdidas}$$

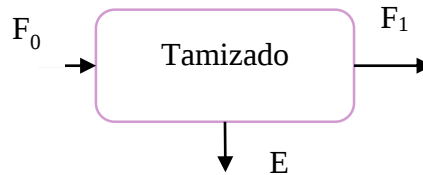
$$C = F_0 + D \quad \text{Ec. 3. 7.}$$

$$F_0 = C - D$$

$$F_0 = 48,5\text{Kg} - (48,5 * 2\%\text{Kg})$$

$$F_0 = 47,53\text{Kg}$$

3.6.1.3. Etapa de tamizado



F_0 = Piedra Caliza sin clasificar

E =Perdidas partículas suspendidas

F_1 = Piedra Caliza clasificada

Balance Global:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Pérdidas}$$

$$F_0 = F_1 + E \quad \text{Ec. 3. 8.}$$

$$F_1 = F_0 - E$$

$$F_2 = 47,53 \text{ kg} - (47,53\text{kg} * 1,5\%)$$

$$F_2 = 46,81 \text{ kg}$$

3.6.1.4. Etapa de almacenamiento



F_1 = Piedra Caliza con granulometría seleccionada

F_2 = Piedra Caliza fraccionada

H = almacenaje

Balance global:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{almacenaje}$$

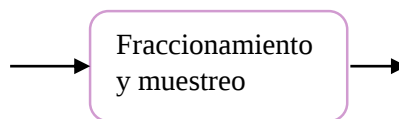
$$F_1 = F_2 + H \quad \text{Ec. 3. 9.}$$

$$F_2 = F_1 - H$$

$$F_2 = 46,81 \text{ kg.} - 20,31 \text{ kg.}$$

$$F_2 = 26,5 \text{ kg.}$$

3.6.1.5. Fraccionamiento y muestreo



F_2 = Piedra Caliza con granulometría seleccionada

F = Fracción de muestra piedra Caliza

M =

Balance global:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{almacenaje}$$

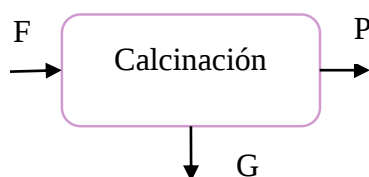
$$F_2 = F + M \quad \text{Ec. 3. 10.}$$

$$F = F_2 - M$$

$$F = 26,5 - 25,5$$

$$F = 1 \text{ kg.}$$

3.6.1.6. Etapa de calcinación



G = Gas (CO₂) liberado

F = Piedra Caliza con granulometría seleccionada

P = Sólido, óxido de calcio en trozo

Balance global:

$$F = P + G \quad \text{Ec. 3. 11.}$$

$$P = F - G$$

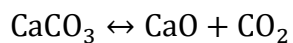
$$P = 1 \text{ kg} - 0,398 \text{ kg}$$

$$P = 0,603 \text{ kg}$$

Balance general:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Producción} \quad \text{Ec. 3. 12}$$

$$F (\text{piedra Caliza}) - G (\text{CO}_2 \text{ liberado}) = P (\text{Óxido de calcio})$$



Cuadro III-5: Datos para balance de materia

PIEDRA CALIZA		masa (g)
Alimentación (F)		1000
Componentes	%	
Pureza (CaCO_3)	90,71	907,1
Impurezas	9,29	92,9
CAL VIVA (P)	%	
CaO disponible	84,9	
PPC	0,34	
Impurezas	5,31	

Fuente: Elaboración propia, 2025.

a) Cálculo de CaO y CO_2 total en la piedra caliza por estequiometría

Cuadro III-6: Peso Molecular de componentes

Datos	
Peso molecular del CO_2	44 g
Peso molecular del CaCO_3	100 g
Peso molecular del CaO	56 g

Fuente: Elaboración propia, 2025.

$$\text{Masa de CaO} = m * \frac{PM \text{ CaO}}{PM \text{ CaCO}_3} \quad \text{Ec. 3. 13.}$$

$$\text{Masa de CaO} = 907,1 * \frac{56}{100} = 507,976 \text{ g}$$

$$\text{Masa de CO}_2 = m * \frac{PM \text{ CO}_2}{PM \text{ CaCO}_3} \quad \text{Ec. 3. 14.}$$

$$\text{Masa de CO}_2 = 907,1 * \frac{44}{100} = 399,124$$

b) Cálculo de masa de cal viva:

$$P_{\text{CaO}} = \text{CaO}_{\text{total}} + \text{CO}_2 + \text{impurezas} \quad \text{Ec. 3. 15.}$$

$$P_{CaO} = 507,976 \text{ g} + 0,34\% * P_{CaO} + 92,9 \text{ g}$$

$$P_{CaO} - 0,34\% * P_{CaO} = 507,976 \text{ g} + 92,9 \text{ g}$$

$$P_{CaO} = 507,976 \text{ g} + 92,9 \text{ g} / (1 - 0,34\%)$$

$$P_{CaO} = 602,93 \text{ g}$$

c) Cálculo de masa del CO₂ liberado en la calcinación:

$$F_{\text{piedra caliza}} = P_{CaO} + G_{CO_2 \text{ liberado}} \quad \text{Ec. 3. 16.}$$

$$1000 \text{ g} = 602,93 \text{ g} + G_{CO_2 \text{ liberado}}$$

$$G_{CO_2 \text{ liberado}} = 1000 \text{ g} - 602,93 \text{ g}$$

$$G_{CO_2 \text{ liberado}} = 397,07 \text{ g}$$

3.6.2. Balance de masa por componentes del óxido de calcio

a) Cálculo de masa de CO₂ en la cal viva:

$$CO_{2CaO} = PPC\% * m \quad \text{Ec. 3. 17.}$$

$$CO_{2CaO} = 0,34\% * 602,93 \text{ g}$$

$$CO_{2CaO} = 2,05 \text{ g}$$

b) Cálculo de masa y porcentaje de CaO crudo en la cal viva:

$$CaO_{\text{crudo}} = m * \left(\frac{PM \text{ CaO}}{PM \text{ CO}_2} \right) \quad \text{Ec. 3. 18.}$$

$$CaO_{\text{crudo}} = 2,05 \text{ g} * \left(\frac{56}{44} \right)$$

$$CaO_{\text{crudo}} = 2,60 \text{ g}$$

$$CaO_{\text{crudo}} = m * \left(\frac{100\%}{m \text{ total}} \right) \quad \text{Ec. 3. 19.}$$

$$CaO_{\text{crudo}} = 2,60 \text{ g} * \left(\frac{100\%}{602,93 \text{ g}} \right)$$

$$CaO_{crudo} = 0,432\%$$

c) Cálculo del peso de CaO disponible:

$$CaO_{disponible} = m_{total} * \left(\frac{\%CaO \text{ disponible}}{100\%} \right) \quad (\text{Ec. 3. 20})$$

$$CaO_{disponible} = 602,93 \text{ g} * \left(\frac{93,681\%}{100\%} \right)$$

$$CaO_{disponible} = 564,83$$

d) Cálculo de masa y porcentaje de CaO requemado:

$$CaO = Ca_{disponible} + CaO_{crudo} + CaO_{requemado} + CO2_{cao} + impurezas \quad (\text{Ec. 3. 21})$$

$$602,93 = 564,83 \text{ g} + 2,60 \text{ g} + CaO_{requemado} + 2,05 \text{ g} + 32,01 \text{ g}$$

$$CaO_{requemado} = 602,93 - 601,49$$

$$CaO_{requemado} = 1,44 \text{ g}$$

$$CaO_{requemado} = 1,44 \text{ g} * \left(\frac{100}{602,93} \right)$$

$$CaO_{requemado} = 0,234 \%$$

e) Cálculo del porcentaje de impurezas:

$$Impurezas = m * \left(\frac{100}{m_{total}} \right) \quad \text{Ec. 3. 22.}$$

$$Impurezas = 32,01 \text{ g} * \left(\frac{100}{602,93 \text{ g}} \right)$$

$$Impurezas = 5,30 \text{ g}$$

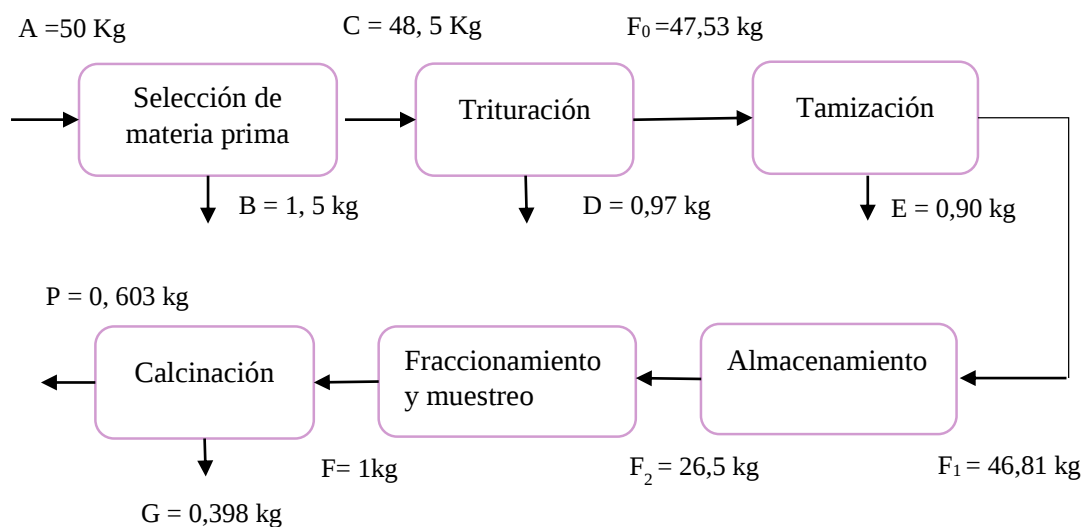
Tabla III-8: Resultados del balance de materia por componentes de óxido de calcio

ÓXIDO DE CALCIO	% CaO total	% CaO disponible	93,681
		% CaO crudo	0,432
		% CaO requemado	0,234
	% Impurezas	% Impurezas	5,309
	% CO ₂ (PPC crudo)	% CO ₂ (PPC crudo)	0,34
		TOTAL	100

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la figura III-2, está el resumen general del diagrama de flujo del balance de materia para la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio.

Figura III-2: Diagrama de flujo del balance de materia para obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza.

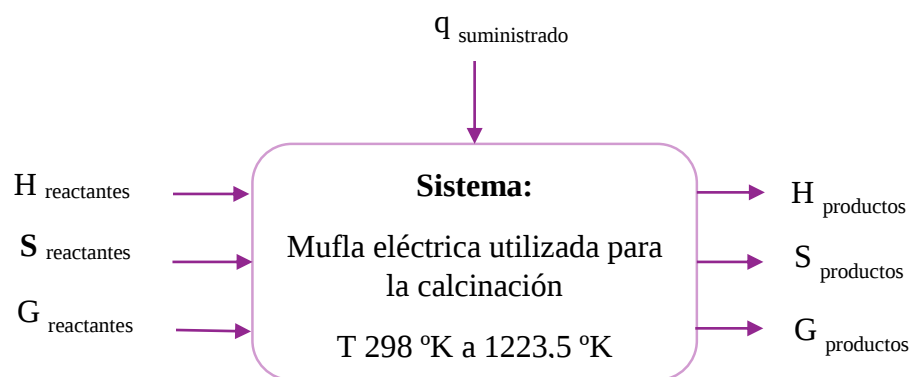


Fuente: Elaboración propia, 2025.

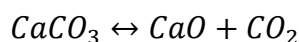
3.7. Balance de energía

Se desarrolla el balance de energía del proceso de obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza en la etapa donde hubo consumo de energía eléctrica. Este balance de igual forma se realiza con la muestra que obtuvo el mayor rendimiento, que es la muestra M₂₋₁, en condiciones de presión constante.

Figura III-3: Sistema de balance de energía en la calcinación de la piedra caliza



Fuente: Elaboración propia, 2025.



$$q_{\text{suministrado}} = (H_{\text{productos}} - H_{\text{reactantes}}) + (S_{\text{productos}} - S_{\text{reactantes}}) + (G_{\text{productos}} - G_{\text{reactantes}}) \text{ Ec.3.23.}$$

$$q_{\text{suministrado}} = \Delta H_{\text{reacción}} + \Delta S_{\text{reacción}} + \Delta G_{\text{reacción}} \quad (\text{Ec. 3.24})$$

3.7.1. Balance de entalpia

a) Datos termodinámicos a 25°C = 298°K ΔH^0_{RX}

$$(\Delta H_f^0)_{\text{CaO}} = -159,9 \text{ kcal/mol}$$

$$(\Delta H_f^0)_{\text{CO}_2} = -94,052 \text{ kcal/mol}$$

$$(\Delta H_f^0)_{CaCO_3} = -288,45 \text{ kcal/mol}$$

b) Determinación del ΔH_{RX}^0 (T= 298°K)

$$\Delta H_{rx(T=298^\circ K)}^0 = \sum n\Delta H_{rx}^0_{\text{productos}} - \sum n\Delta H_{rx}^0_{\text{reactantes}} \quad (\text{Ec. 3. 25})$$

$$\Delta H_{rx}^0 = (1 * (\Delta H_f^0)_{CaO} + 1 * (\Delta H_f^0)_{CO_2}) - (1 * (\Delta H_f^0)_{CaCO_3})$$

$$\Delta H_{rx}^0 = \left(1 \text{ mol} * \left(-159,9 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \right) + \left(1 \text{ mol} * \left(-94,052 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \right) - \left(1 \text{ mol} * \left(-288,45 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right) \right)$$

$$\Delta H_{rx(T=298^\circ K)}^0 = 42,498 \text{ cal} > 0$$

c) Tablas termodinámicas: capacidades caloríficas de las sustancias Cp: Cal/mol°K

$$Cp_{CO_2}^0 = 6,85 + 8,5 * 10^{-3}T$$

$$Cp_{CaO}^0 = 10,0 + 4,8 * 10^{-3}T$$

$$Cp_{CaCO_3}^0 = 19,7 + 11,9 * 10^{-3}T$$

$$\Delta Cp^0 = \sum nCp_{\text{productos}} - \sum nCp_{\text{reactantes}} \quad \text{Ec. 3. 26}$$

$$\Delta Cp^0 = (6,85 + 8,5 * 10^{-3}T + 10,0 + 4,8 * 10^{-3}T) - (19,7 + 11,9 * 10^{-3}T)$$

$$\Delta Cp^0 = -2,85 + 1,4 * 10^{-3}T$$

d) Determinación del calor de reacción a 1223,5°K

$$\Delta H_{RT}^0 = \Delta H_{RT}^0 + \int_{T_0}^T \Delta Cp \, dT \quad \text{Ec. 3. 27}$$

$$\Delta H_{R(T=298^\circ K)}^0 = \Delta H_{RT}^0 + \int_{T_0}^T \Delta Cp \, dT$$

$$42498 = \Delta H_{RT}^0 + \int_{T_0}^T (-2,85 + 1,4 * 10^{-3}T) dT$$

$$42498 = \Delta H_{RT}^0 + (-2,85 * T + \frac{1,4}{2} * 10^{-3} * T^2)$$

$$\Delta H_{RT}^0 = 42498 + 2,85 * (298) - \frac{1,4 * 10^{-3}}{2} * (298^2)$$

$$\Delta H_{RT}^0 = 43285,14 \text{ cal}$$

$$\Delta H_{R(T=1223,5^\circ K)}^0 = \Delta H_0^0 + \int_{T=0}^{T=1223,5} \Delta C_p dT$$

$$\Delta H_{R(T=1223,5^\circ K)}^0 = 43285,14 + (-2,85 * 1223,5 + \frac{1,4}{2} * 10^{-3} * T^2)$$

$$\Delta H_{R(T=1223,5^\circ K)}^0 = 43285,14 + (-2,85 * 1223,5 + \frac{1,4}{2} * 10^{-3} * (1223,5^2))$$

$$\Delta H_{R(T=1223,5^\circ K)}^0 = 40846,031 \text{ cal}$$

3.7.2. Balance de entropía de reacción

El balance de entropía de la reacción en la calcinación de piedra caliza se realiza para cuantificar el cambio de desorden generado por la descomposición del CaCO_3 y evaluar la irreversibilidad del proceso. Además, permite determinar la influencia de la entropía en la energía libre de Gibbs y verificar la factibilidad de la reacción a diferentes temperaturas, aportando criterios para mejorar la eficiencia energética del sistema (Çengel & Boles, 2015).

a) Determinación de $\Delta S_{RX(T=298^\circ K)}^0 =$

$$(S_f^0)_{CaO} = 9,5 \text{ cal/mol}^\circ K$$

$$(S_f^0)_{CO2} = 51,061 \text{ cal/mol}^\circ K$$

$$(S_f^0)_{CaCO3} = 22,2 \text{ cal/mol}^\circ K$$

$$\Delta S_{rx}^0 = \sum n \Delta S_{rx_{productos}}^0 - \sum n \Delta S_{rx_{reactantes}}^0 \quad \text{Ec. 3.28}$$

$$\Delta S_{rx}^0 = (1 * (S_f^0)_{CaO} + 1 * (S_f^0)_{CO_2}) - (1 * (S_f^0)_{CaCO_3})$$

$$\Delta S_{rx}^0 = \left(1 \text{ mol} * \left(9,5 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) + 1 \text{ mol} * \left(51,061 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) \right) - \left(1 \text{ mol} * \left(22,2 \frac{\text{cal}}{\text{mol}^\circ\text{K}} \right) \right)$$

$$\Delta S_{rx(T=298^\circ\text{K})}^0 = 38,361 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{K}} > 0$$

b) Determinación de la $\Delta S_{RT=298^\circ\text{K}}^0$

$$\Delta S_{R(T=298^\circ\text{K})}^0 = \Delta S_{T=0}^0 + \int_{T=0}^{T^{298^\circ\text{K}}} \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$38,361 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{K}} = \Delta S_0^0 + \int_{T=0}^{T^{298^\circ\text{K}}} \frac{-2,85 + 1,4 * 10^{-3}T}{T} dT$$

$$38,361 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{K}} = \Delta S_0^0 - 2,85 \ln T + 1,4 * 10^{-3}T$$

$$38,361 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{K}} = \Delta S_0^0 - 2,85 \ln(298) + 1,4 * 10^{-3}(298)$$

$$\Delta S_0^0 = 54,18 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{K}}$$

Entropía a 1223,5°K

$$\Delta S_{R(T=1223,5^\circ\text{K})}^0 = \Delta S_{T=0}^0 + \int_{T=0}^{T^{1223,5}} \frac{\Delta C_p}{T} dT$$

$$\Delta S_{R(T=1223,5^\circ\text{K})}^0 = \Delta S_{T=0}^0 - 2,85 \ln T + 1,4 * 10^{-3}T$$

$$\Delta S_{R(T=1223,5^\circ\text{K})}^0 = 54,18 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{K}} - 2,85 \ln(1223,5) + 1,4 * 10^{-3}(1223,5)$$

$$\Delta S_{R(T=1223,5^{\circ}K)}^0 = 35,63 \frac{cal}{^{\circ}K}$$

3.7.3. Calculo de energía libre de Gibbs

$$\Delta G_{RT(T=298^{\circ}K)} = \Delta H - T\Delta S \quad \text{Ec. 3. 30}$$

$$\Delta G_{RT(T=298^{\circ}K)} = 42498 \text{ cal} - 298^{\circ}K * 38,361 \frac{cal}{^{\circ}K}$$

$$\Delta G_{RT(T=298^{\circ}K)} = 31066,42 \text{ cal}$$

$$\Delta G_{RT(T=1223,5^{\circ}K)} = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G_{RT(T=1223,5^{\circ}K)} = 40846,031 \text{ cal} - 1223,5^{\circ}K * 35,63 \frac{cal}{^{\circ}K}$$

$$\Delta G_{RT(T=1223,5^{\circ}K)} = -2747,274 \text{ cal}$$

3.7.4. Cálculo de calor suministrado al sistema para llegar a la temperatura de 1223,5°K

$$q_{suministrado} = \Delta H_{reacción} + \Delta S_{reacción} + \Delta G_{reacción}$$

$$q_{suministrado} = 40846,031 \text{ cal} + 38,361 \frac{cal}{^{\circ}K} + (-2747,274 \text{ cal})$$

$$q_{suministrado} = 38137,123 \text{ cal} = 38,13 \text{ kcal}$$

El tiempo que permanece en la mufla es 10,5 hrs, pues 8 horas de calcinación y 2.5 hrs el tiempo que tarda mufla en alcanzar los 950 °C.

Sabemos que 1 kcal = 4184 J, entonces convertimos 38,13kcal* 4184J/kcal =159432,72J

El tiempo que tenemos es de 10.5 horas, y necesitamos convertirlo a segundos. Sabemos que 1 hora = 3600 segundos, entonces 10,5 h*3600 s/h =37800 s

Calculo de la potencia promedio

$$P = Q_{suministrado} / t \quad \text{Ec. 3. 31}$$

P es la potencia en watts (W)

E es la energía en joules (J)

t es el tiempo en segundos (s)

$$P = \frac{159432,72 \text{ J}}{37800 \text{ s}} = 4,22 \text{ J/s} = 4,22 \text{ W}$$

3.7.5. Balance de energía del sistema de calcinación en la mufla

El calor que la mufla entrega al sistema, es distribuido entre la energía utilizada para calentar la mufla, la reacción de calcinación, y las pérdidas térmicas.

$$Q_{\text{eléctrico}} = Q_{\text{reacción}} + Q_{\text{sensible}} + Q_{\text{pérdidas}} \quad \text{Ec. 3. 32}$$

El calor absorbido por la mufla se calcula utilizando su capacidad calorífica C_p y el cambio de temperatura ΔT . La ecuación general es:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad \text{Ec. 3. 33}$$

3.7.5.1. Energía absorbida por la mufla calor sensible

El calor sensible total requerido para calentar los componentes estructurales de la mufla se calculará por separado tomando en cuenta la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{sensible}} = Q_{\text{acero}} + Q_{\text{ladrillo refractario}} \quad \text{Ec. 3. 34}$$

Datos:

Cuadro III-7: Datos de calor específico para mufla

Componente de la Mufla	Material Típico	Cp (Calor Especifico) [kJ/(kg·°C)]	Estándar
Carcasa	Acero	0,447	Tablas de Propiedades Termodinámicas de Metales, para el hierro y acero
Aislamiento	Cerámica Refractaria Aislante	0,85	Literatura de Ingeniería de Materiales Refractarios

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Masa de mufla = 45kg

Carcasa = 40% = 150 kg * 40% = 60 Kg

Cerámica refractaria = 60% = 150Kg*60% = 90 Kg

Calculo de la carcasa

$$Q_{acero} = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{acero} = 60 \text{ kg} * 0,46 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (925^\circ\text{C})$$

$$Q_{acero} = 25530 \text{ kJ}$$

Calculo de ladrillo refractario

$$Q_{ladrillo} = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{ladrillo} = 90 \text{ kg} * 0,85 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} * (925^\circ\text{C})$$

$$Q_{ladrillo} = 70762,5 \text{ kJ}$$

Calculo de Q sensible total:

$$Q_{sensible} = Q_{acero} + Q_{ladrillo \text{ refractario}}$$

$$Q_{sensible} = 25530 \text{ kJ} + 70762,5 \text{ kJ}$$

$$Q_{sensible} = 96292,5 \text{ kJ} = 96292500 \text{ J}$$

Calculo de potencia promedio

$$P = Q_{sensible} / t$$

El tiempo de calcinación es 10,5 h = 37800 s

$$P = \frac{96292500 \text{ J}}{37800 \text{ s}} = 2547,42 \text{ J/s} = 2547,42 \text{ W}$$

3.7.5.2 Pérdidas de energía en la mufla

Calculo de Q_{perdidas} :

$$Q_{\text{perdidas}} = Q_{\text{radiación}} + Q_{\text{convección}} \quad \text{Ec. 3. 35}$$

Cuadro III-8: Parámetros para cálculo de pérdidas de energía

Parámetro	Símbolo	Valor Típico o Fuente	Nota de Medición
Temperatura de la Superficie Externa	T superficie	50 °C=323,15K	Temperatura mientras la mufla operaba a 120°C.
Temperatura Ambiente	T ambiente	≈25°C=298,15K	Temperatura del laboratorio.
Área Superficial Externa	A	1,79 m ²	62,7cm×51,3cm×50,3cm de la mufla
Emisividad de la Carcasa	ε	0.7	Para acero pintado u oxidado. Se puede usar 0.7.
Coeficiente de Convección	h	10 W/(m ² ·K)	Valor típico para convección natural en aire.
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.67×10 ⁻⁸ W/m ² ·K ⁴	Constante universal para el cálculo de radiación.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La pérdida por radiación, que domina a altas temperaturas superficiales, se calcula mediante la Ley de Stefan-Boltzmann (Bergman & Lavine, 2007).

$$Q_{\text{radiación}} = \varepsilon * \sigma * A * T^4 \quad \text{Ec. 3. 36.}$$

$$Q_{\text{radiación}} = \varepsilon * \sigma * A * (T_{\text{superficie}}^4 - T_{\text{ambiente}}^4)$$

$$Q_{\text{radiación}} = 0,7 * 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} * 1,79 \text{m}^2 * (323,15 \text{K}^4 - 298,15 \text{K}^4)$$

$$Q_{\text{radiación}} = 213,33 \text{ W}$$

La pérdida por convección (transferencia de calor al aire circundante) se calcula mediante la Ley de Enfriamiento de Newton:

$$Q_{\text{convección}} = h * A * T_{\text{superficie}} - T_{\text{ambiente}} \quad \text{Ec. 3. 37.}$$

$$Q_{convección} = 10 \frac{W}{m^2 K} * 1,79 m^2 * (323,15 K - 298,15 K)$$

$$Q_{convección} = 447,5 W$$

La pérdida total de energía es la suma de la energía pérdida por radiación y por convección

$$Q_{pérdidas} = Q_{radiación} + Q_{convección}$$

$$Q_{pérdidas} = 213,33 W + 447,5 W$$

$$Q_{pérdidas} = 660,83 W$$

Este valor representa la energía que se pierde al ambiente debido a los procesos de radiación y convección, y es fundamental para la eficiencia de la mufla.

$$Q_{eléctrico} = Q_{reacción} + Q_{sensible} + Q_{pérdidas}$$

$$Q_{eléctrico} = 4,22 W + 2547,42 W + 660,83 W = 3212,47 W = 3,2123 kW$$

Calculo de la energía total

Tiempo de calcinación es 10,5 hrs

$$E_{total} = P * t \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$E_{total} = 3,2123 kW * 10,5 h$$

$$E_{total} = 33,73 kWh$$

$$E_{total} = 33,73 kWh * 3600 kJ / kWh$$

$$E_{total} = 121428 kJ$$

Este valor representa la energía térmica suministrada por la mufla para alcanzar la temperatura de 950 °C y mantenerla durante el tiempo requerido para la descomposición del carbonato de calcio. Con este dato energético, se determina el consumo específico de energía en función de la masa real de óxido de calcio obtenida.

De acuerdo con los resultados experimentales, por cada 1 kg de piedra caliza se obtiene 602,93 g de CaO, equivalentes a 0,60293 kg de producto

El consumo específico de energía se obtiene mediante la relación:

$$E_{específica} = 121428 \text{ kJ} / 0,60293 \text{ kg}$$

$$E_{específica} = 201283 \text{ kJ} / \text{Kg de CaO}$$

Este valor representa la energía requerida para producir un kilogramo de cal a escala laboratorio utilizando la mufla. Es habitual que los consumos específicos a escala laboratorio sean elevados, debido a características propias del equipo: baja eficiencia térmica, pérdidas de calor importantes por las paredes refractarias, como señalan Moran y Shapiro (2010), estos factores incrementan notablemente la energía necesaria por unidad de producto cuando el sistema no opera bajo condiciones industriales optimizadas.

Al comparar este valor con la escala industrial, la diferencia es considerable. Los hornos rotatorios utilizados en la industria calera reportan consumos típicos entre 3.000 y 4.500 kJ/kg de CaO, gracias a sistemas de recuperación de calor, atmósferas controladas y configuraciones térmicas optimizadas (European Lime Association, 2019; UNIDO, 2010).

En conclusión diferencia evidencia que el propósito del ensayo es estrictamente experimental, y que los valores obtenidos no deben interpretarse como representativos de una operación industrial, sino como propios de un sistema de laboratorio cuya finalidad es comprender los fenómenos termoquímicos y no maximizar la eficiencia energética.

3.7.6. Consumo de energía

La energía consumida se calcula en función de la potencia de cada equipo utilizado en la fase experimental (Moran & Bailey, 2011).

Consumo de energía eléctrica en la etapa de calcinación en la mufla

Datos:

Tiempo = $t = 8$ h de calcinación y 2,5 h que tarda en alcanzar la temperatura deseada.

Temperatura = 950 °C

Potencia de la estufa = $P_{estufa} = 3,2$ kW

Energía consumida por la estufa = $E_{estufa} =$

$$E_{estufa} = P_{estufa} * t * f \quad \text{Ec. 3.39}$$

$$E_{estufa} = 3,2 \text{ kW} * 10,5 \text{ h}$$

$$E_{estufa} = 33,6 \text{ kWh}$$

3.8. Determinación del rendimiento

El rendimiento se calcula comparando la cantidad real de CaO obtenida con el rendimiento teórico. M2-1 La fórmula es la siguiente:

El rendimiento teórico:

$$\frac{\text{Masa de CaO}}{\text{Masa de CaCO}_3} = \frac{56,08}{100,09} = 0,56$$

$$\text{Rendimiento}\% = \left(\frac{\text{cantidad de CaO disponible}}{\text{cantidad teorica de CaO}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 3.40.}$$

$$\text{Rendimiento}\% = \left(\frac{52,46}{56} \right) * 100$$

$$\text{Rendimiento}\% = 93,67\%$$

3.9. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realiza mediante el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 25, el cual permite realizar el análisis de datos mediante

un tratamiento integrado de todas las fases y obteniendo resultados confiables y significativos (IBM Corp., 2017).

3.9.1. Análisis de varianza univariante

Se realiza el análisis de varianza univariante para determinar la influencia que tienen los factores de granulometría, temperatura de calcinación y tiempo de residencia en el horno y sus interacciones sobre la variable respuesta el porcentaje de óxido de calcio disponible

3.9.1.1. Análisis de varianza univariante del rendimiento

En la tabla III-9 se muestran los datos introducidos al programa IBM SPSS de acuerdo al diseño factorial planteado.

Tabla III-9: Datos para el uso del programa IBM SPS

Muestra	Variables independientes			Variable dependiente
	Granulometría	Temperatura de calcinación	Tiempo de residencia	Oxido de calcio disponible
M ₁₋₁	-1	-1	-1	85,792
M ₂₋₁	1	-1	-1	93,681
M ₃₋₁	-1	1	-1	84,702
M ₄₋₁	1	1	-1	77,701
M ₅₋₁	-1	-1	1	76,321
M ₆₋₁	1	-1	1	86,639
M ₇₋₁	-1	1	1	82,132
M ₈₋₁	1	1	1	83,622
M ₁₋₂	-1	-1	-1	85,792
M ₂₋₂	1	-1	-1	91,221
M ₃₋₂	-1	1	-1	81,921
M ₄₋₂	1	1	-1	76,744
M ₅₋₂	-1	-1	1	78,743
M ₆₋₂	1	-1	1	83,911

M₇₋₂	-1	1	1	80,733
M₈₋₂	1	1	1	81,689

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los factores inter-sujetos se muestran en la Tabla III-10 con la codificación de cada nivel para la determinación de variables significativas.

Tabla III-10: Factores inter-sujetos

Factores inter-sujetos		
		N
Granulometría	-1.00	8
	1.00	8
Temp_calcinación	-1.00	8
	1.00	8
Tiempo_residencia	-1.00	8
	1.00	8

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

En la Tabla III-11 se muestra las pruebas inter-sujetos donde se observa si las variables y sus interacciones son significativas.

Tabla III-11: Pruebas inter-sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	326,102a	6	54,350	18,417	0,000
Intersección	110778,804	1	110778,804	37537,878	0,000
Granulometría	22,739	1	22,739	7,705	0,022
Temp_calcinacion	67,478	1	67,478	22,865	0,001
Tiempo_residencia	35,284	1	35,284	11,956	0,007
Granulometría * Temp_calcinacion	92,804	1	92,804	31,447	0,000
Granulometría * Tiempo_residencia	17,623	1	17,623	5,972	0,037
Temp_calcinacion * Tiempo_residencia	90,174	1	90,174	30,556	0,000
Error	26,560	9	2,951		

Total	111131,466	16			
Total corregido	352,662	15			
a. R al cuadrado = ,925 (R al cuadrado ajustada = ,874)					

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

Se puede observar que las variables granulometría, temperatura de calcinación, tiempo de residencia y sus interacciones de granulometría*temperatura de calcinación, granulometría * tiempo de residencia y temperatura de calcinación*tiempo de residencia, son significativas ya que poseen una significancia menor al 0,05 para un nivel de confianza del 95%.

3.9.2. Determinación del modelo matemático

Una vez identificadas las variables significativas, se realiza una regresión lineal para determinar el modelo matemático, mostrado en la tabla III-12.

Tabla III-12: Resumen del modelo matemático

Resumen del modelo ^b				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,962a	0,925	0,874	1,71788
a. Predictores: (Constante), Temp_calcinacion_Tiempo_residencia, Granulometria_Tiempo_residencia, Granulometria_Temp_calcinacion, Tiempo_residencia, Temp_calcinacion, Granulometria				
b. Variable dependiente: CaO_disponible				

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

En la tabla III-13 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), donde se observa que el nivel de significancia tiende a cero indicando que el modelo matemático es correcto.

Tabla III-13: Resultado del análisis ANOVA

Fuente	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	326,102	6	54,350	18,417	,000 ^b
Residuo (error)	26,560	9	2,951		
Total	352,662	15			
a. Variable dependiente: CaO_disponible					
b. Predictores: (Constante), Temp_calcinacion_Tiempo_residencia, Granulometria_Tiempo_residencia, Granulometria_Temp_calcinacion, Tiempo_residencia, Temp_calcinacion, Granulometria					

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

La tabla III-14 muestra los coeficientes del modelo matemático:

Tabla III-14: Coeficientes del modelo matemático

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados			95,0% intervalo de confianza para B	
		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	83,209	0,429		193,747	0,000	82,237	84,180
	Granulometría	1,192	0,429	0,254	2,776	0,022	0,221	2,164
	Temp_calcinación	-2,054	0,429	-0,437	-4,782	0,001	-3,025	-1,082
	Tiempo_residencia	-1,485	0,429	-0,316	-3,458	0,007	-2,457	-0,513
	Granulometría_Temp_calcinación	-2,408	0,429	-0,513	-5,608	0,000	-3,380	-1,437
	Granulometría_Tiempo_residencia	1,050	0,429	0,224	2,444	0,037	0,078	2,021
	Temp_calcinación_Tiempo_residencia	2,374	0,429	0,506	5,528	0,000	1,402	3,346
a. Variable dependiente: CaO_disponible								

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

De acuerdo al diseño factorial propuesto, se observa que todas las variables son significativas al 95 % por poseer un valor de significancia menor a 0,05. Con los

valores numéricos de B se obtiene la ecuación de la regresión lineal para el óxido de calcio disponible.

$$\text{CaO disponible: } 83,209 + 1,192G - 2,054T_c - 1,485T_r - 2,408 G * T_c + 1,050 G * T_r + 2,374 T_c * T_r$$

Donde:

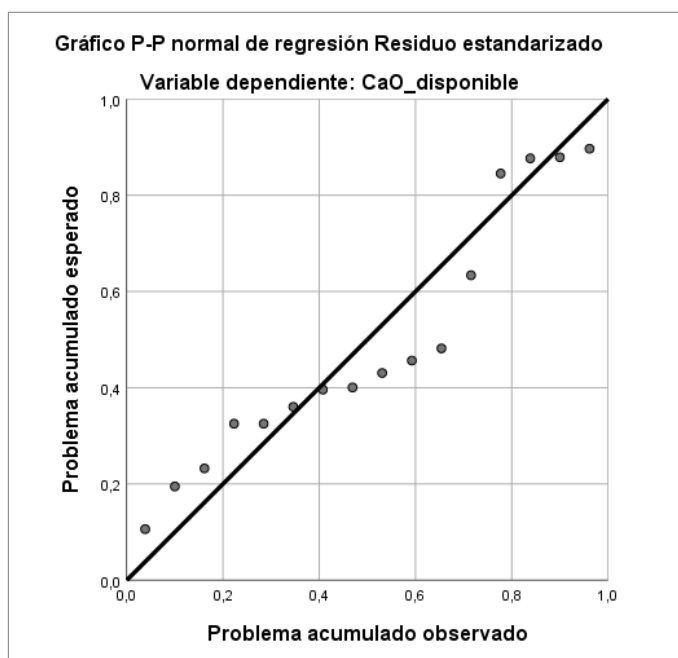
G = Granulometría

T_c = Temperatura de calcinación

T_r = Tiempo de residencia

En la figura III- 4 se muestra el modelo lineal, el cual indica la relación entre la variable dependiente y las variables independientes.

Figura III-4: Modelo lineal



Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

Mediante los puntos se observa que algunas correlaciones no se ajustan al modelo, sin embargo, el análisis ANOVA no muestra gran significancia de ajuste, por lo que el

modelo es correcto. Con la regresión lineal realizada se obtuvo nuevos datos del oxido de calcio disponible, los cuales se encuentran en la siguiente tabla III-15.

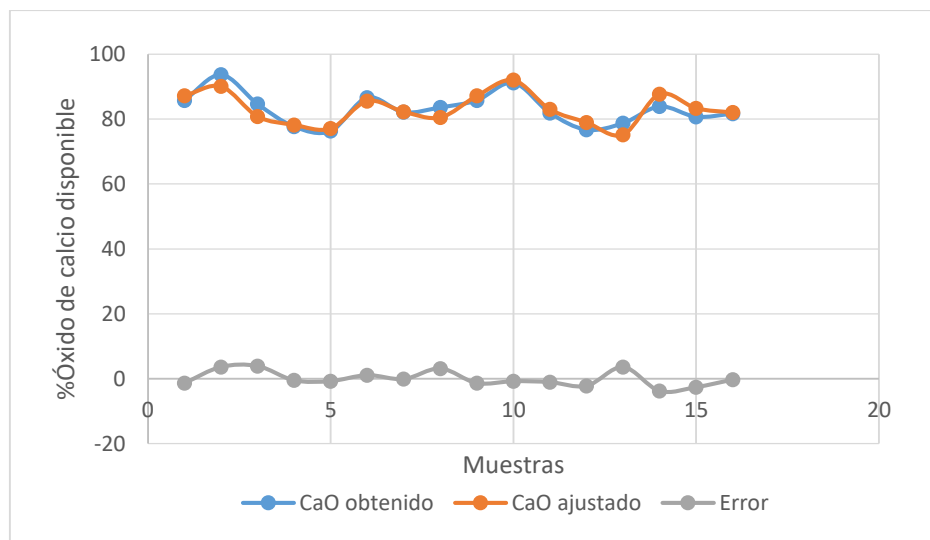
Tabla III-15: Comparación del rendimiento obtenido experimentalmente y la corrección del rendimiento obtenido por el programa SPSS.

Muestra	CaO disponible	Ajustado por el programa	Error
M₁₋₁	85,79	87,18	-1,39
M₂₋₁	93,68	90,11	3,57
M₃₋₁	84,7	80,84	3,86
M₄₋₁	77,7	78,23	-0,53
M₅₋₁	76,32	77,09	-0,77
M₆₋₁	86,64	85,60	1,04
M₇₋₁	82,13	82,27	-0,14
M₈₋₁	83,62	80,52	3,10
M₁₋₂	85,79	87,18	-1,39
M₂₋₂	91,22	92,02	-0,80
M₃₋₂	81,92	83,01	-1,09
M₄₋₂	76,74	78,98	-2,24
M₅₋₂	78,74	75,21	3,53
M₆₋₂	83,91	87,72	-3,81
M₇₋₂	80,73	83,36	-2,63
M₈₋₂	81,69	82,02	-0,33

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa SPSS, 2025.

Los datos de rendimiento obtenidos experimentalmente y los obtenidos por el programa SPSS se grafican a continuación en la figura III-5 para verificar el ajuste de la ecuación del modelo matemático.

Figura III-5: % Óxido de calcio disponible experimental vs % Óxido de calcio disponible del modelo vs Error



Fuente: Elaboración propia, 2025.

CAPÍTULO IV

COSTOS DEL PROYECTO

4.COSTOS DEL PROYECTO

4.1. Evaluación de costos

Para determinar el presupuesto del presente proyecto de investigación, se realiza la evaluación de costos de los gastos en la elaboración de todo el proyecto.

Tabla IV-1: Detalle de costos de materia prima y reactivos utilizados en la parte experimental de la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio.

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Piedra Caliza	50	kg	0,59	29,5
2	Agua desionizada	4	L	10	40
3	Agua ultra pura	24	L	7	168
Total					237,5

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-2: Detalle de costos de materiales adquiridos en la parte experimental de la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio.

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Taper de plástico 40 L	1	pza	95	95
2	Contenedor para herramientas	1	pza	85	85
3	Bureta	1	pza	84	84
4	Piseta	1	pza	76	76
5	Vaso precipitado	1	pza	90	90
6	Bowl de acero inoxidable 2 L	1	pza	55	55

7	Bowl de acero inoxidable 1,5 L	1	pza	35	35
8	Mortero	1		75	75
9	Mascarilla	1	pza	55	55
10	Gafas de protección	1	pza	35	35
11	Varilla de vidrio	1	pza	35	35
12	Papel aluminio	1	pza	14	14
13	Guantes nitrilo	5	pza	3	15
14	Guantes de neopreno	1	pza	12	12
15	Martillo	1	pza	25	25
16	Bolsas cierre hermético	60	pza	1,5	90
17	Vaso de tergopol	1	pza	12	12
18	Bolsa de bolitas de tergopol	1	pza	5	5
19	Galón de 10L	1	pza	25	25
20	Detergente	1	pza	20	20
21	Esponjas	2	pza	3	6
22	Pilas alcalinas	2	pza	6	12
23	Taladro	1	pza	350	350
24	Escobilla de polvo	1	pza	15	15
25	Espatula de laboratorio	1	pza	35	35
26	Balanza analitica	1	pza	80	80
27	Capsulas de arcilla	10	pza	11	110
TOTAL					1546

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El resto de materiales necesarios para la realización de estudio, son proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho de la carrera de Ingeniería Química y el CEANID.

Tabla IV-3: Detalle de costos de análisis fisicoquímicos

N°	Detalle	Cantidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Fluorescencia de Rayos X (XRF)	1	650	650
2	Titulaciones	20	35	700
3	Fluorescencia de Rayos X (XRF)	1	650	650
Total				2000

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-4: Detalle de costos de material de apoyo

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Investigación en internet	4	Mes	170	680
2	Impresión	650	Hoja	0,3	195
3	Anillados	6	Anillado	6	36
4	Empastado	3	Empastado	75	225
5	Transporte diario	320	Pasaje	1	320
6	Transporte /materia prima	2	Pasaje	50	100
7	Estipendios/viaje	2	Refrigerios	35	70
Total					1626

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para los costos de energía de los equipos utilizados se consideró que, en la ciudad de Tarija, el costo promedio de energía eléctrica es de 0,79 Bs./k Wh

Tabla IV-5: Detalle de costos de energía en equipos utilizados

Nº	Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)	Costo (Bs.)
1	Balanza analítica	0,014	5	0,07	0,063
2	Mufla eléctrica	3,2	200	640	505,6
Total					505,663

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio

Nº	Descripción	Costo (Bs.)
1	Costo de materia prima y reactivos	237,5
2	Costo de materiales adquiridos	1546
3	Costo de análisis fisicoquímicos	2000
4	Costo de material de apoyo	1626
5	Costo de energía de equipos	505,663
6	Costo de mano de obra	7000
Total		12915,163

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo total del proyecto de investigación es de 12915,163 Bs.

4.2. Costo de producción

A partir del balance de materia y energía y el gasto energético de los equipos utilizados, se estima el costo de producción para la obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio procedente del municipio El Puente, provincia Méndez del departamento de Tarija.

El costo de producción se realiza para el mejor experimento obtenido en el diseño experimental M₂₋₁, el cual tiene las variables en la etapa de calcinación la concentración

de óxido de calcio disponible 93.681 %, granulometría de 1", con un tiempo de residencia de 8 h y una temperatura de 950°C.

Los costos fijos asociados al suministro del servicio básico de energía eléctrica presentan un valor unitario de 0,79 Bs/kWh.

Tabla IV-7: Detalle de costos del proceso de obtención

N°	Detalle	Cantidad	Unidad	Precio unitario (Bs.)	Costo (Bs.)
1	Piedra caliza	1	kg	0,59	0,59
	Total				0,59

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla IV-8: Detalle de costos de energía en los equipos utilizados

N°	Equipo	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía consumida (kWh)	Costo (Bs.)
1	Balanza analítica	0,014	0,5	0,007	0,00553
2	Mufla eléctrica	3,2	10,5	33,6	26,5
Total					26,5

Fuente: Elaboración propia, 2025.

El costo total de producción es la suma de los costos del proceso de obtención y del consumo energético de los equipos usados.

$$\text{Costo total} = 0,59 \text{ Bs.} + 26,5 \text{ Bs.} = 27,09 \text{ Bs.}$$

$$\text{Costo total} = \frac{27,09 \text{ Bs.}}{0,603 \text{ kg. de CaO}}$$

Para la producción de 0,603 kg de óxido de calcio por calcinación de piedra caliza a escala laboratorio se tiene un costo de 27,09 Bs.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De acuerdo a lo realizado en el presente proyecto de investigación de obtención de óxido de calcio por calcinación de piedra Caliza, según los objetivos planteados y observando los resultados de los mismos, se llega a las conclusiones siguientes:

Se consigue la caracterización de la piedra Caliza de una cantera en la localidad del "El Puente" (Tarija), cuyos parámetros son : contenido de CaO : 44,95%, contenido de CaCO_3 : 70,4%. Con estos parámetros se determinó la pureza de la piedra Caliza en 90, 71 %, lo cual nos indica la viabilidad del proceso de calcinación y la calidad del óxido de calcio CaO obtenido a partir de esta materia prima.

Se ejecutó el proceso de obtención de óxido de calcio a partir de piedra caliza de la cantera "El Puente" mediante calcinación en mufla eléctrica, utilizando 1000 g de piedra caliza para obtener el mejor rendimiento de óxido de calcio a condiciones de: temperatura de calcinación de 950°C a 1000°C , tiempo de residencia de 8 horas y granulometría de $\frac{3}{4}$ ".

El proceso de calcinación en mufla eléctrica demuestra ser eficiente, con un rendimiento adecuado en la conversión de carbonato de calcio CaCO_3 en óxido de calcio CaO . Las condiciones experimentales ajustadas permitieron obtener un óxido de calcio con un contenido de CaO superior al 85%, lo que asegura reactividad del producto final.

El análisis de costos mostró que la producción de óxido de calcio a escala laboratorio tiene un costo operativo de 44 Bs por kilogramo de producto. A pesar el bajo costo de la materia prima (piedra caliza), el consumo energético es elevado.

La investigación también muestra que la calcinación en una mufla eléctrica tiene menor impacto ambiental en comparación con otros métodos más contaminantes, como los hornos de gas.

En resumen, la presente investigación ha logrado cumplir con los objetivos establecidos, demostrando que el proceso de calcinación en mufla eléctrica es eficiente

desde el punto de vista técnico, produciendo óxido de calcio de alta calidad con impacto ambiental reducido.

5.2 Recomendaciones

Se debe priorizar el uso de piedra Caliza con alto contenido de CaCO_3 y baja presencia de impurezas como óxido de magnesio y sílice.

Es recomendable realizar un análisis más exhaustivo de las características químicas y físicas de la piedra caliza antes del proceso de calcinación, para garantizar un mayor rendimiento en la obtención de óxido de calcio.

No se deben utilizar temperaturas excesivamente altas, ya que esto puede llevar a la sinterización del óxido de calcio, lo que reduce su reactividad.

Se recomienda trabajar dentro de un rango de temperatura de 950°C a 1000°C y ajustar los tiempos de residencia para mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final.

Se sugiere explorar otras tecnologías de calcinación, como hornos de lecho fluidizado o tecnologías que utilicen energía renovable, para reducir el consumo energético y los costos operativos.

Se debe investigar sobre el aprovechamiento del dióxido de carbono CO_2 generado en el proceso de calcinación y otras cenizas residuales, para evaluar su reutilización en otras aplicaciones industriales, lo que no solo mejoraría la rentabilidad del proyecto, sino que también reduciría el impacto ambiental.

Se recomienda continuar la investigación para establecer las mejores condiciones de calcinación del CaCO_3 para obtener CaO de alta calidad,