Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida de cáscara de huevo para ser utilizada en la clarificación del jugo de caña de azúcar

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

Roger Jack VELASQUEZ VALENCIA

ASESOR

Mg. Manuel Jesús LUNA HERNÁNDEZ

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Velasquez, R. (2025). *Análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida de cáscara de huevo para ser utilizada en la clarificación del jugo de caña de azúcar*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Roger Jack Velasquez Valencia
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75325871
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-3030-5507
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Mg. Manuel Jesús Luna Hernández
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06897800
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7487-8543
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. Esteban Cristobal Castellanos Borrero
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02880535
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dr. José Fernandes De Oliveira Ugarte
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	48755147
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.2. Tecnologías para mitigar los impactos ambientales de las actividades industriales
Grupo de investigación	Medio ambiente y tecnologías limpias
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento

Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Facultad de Química e Ingeniería Química País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Cercado de Lima Latitud: -12.060861928004034 Longitud: -77.09745932356137
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Abril 2024 – Agosto 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02 Ingeniería de materiales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.05.00

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "IV Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2025-I", bajo la Presidencia del **Dr. Esteban Cristobal Castellanos Borrero; Dr. José Fernandes De Oliveira Ugarte (Miembro)** y el **Mg. Manuel Jesús Luna Hernández (Asesor);** habiendo presentado para tal efecto la **TESIS,** titulada **Análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida de cáscara de huevo para ser utilizada en la clarificación del jugo de caña de azúcar,** después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborada por el bachiller en Ingeniería Química: **VELASQUEZ VALENCIA, ROGER JACK;** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO,** acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECISIETE 17

(LETRAS) (NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 16 de agosto del 2025

Dr. Ing. Esteban Castellanos B.

Dr. ESTEBAN CRISTOBAL CASTELLANOS BORRERO
Presidente

Dr. JOSÉ FERNANDES DE OLIVEIRA UGARTE
Miembro

Mg. MANUEL JESÚS LUNA HERNÁNDEZ
Asesor

Dr. EDER CLIDIO VICUÑA GALINDO
Director de la E.P. de Ingeniería Química

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Manuel Jesús Luna Hernández** en mi condición de asesor con el Dictamen N°000001-2025-EPIQ-FQIQ/UNMSM de la Tesis cuyo título es **Análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida de cáscara de huevo para ser utilizada en la clarificación del jugo de caña de azúcar,** presentado por el bachiller: **Velasquez Valencia, Roger Jack,** para optar el título Profesional de Ingeniero Químico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 12% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 26 de agosto del 2025

Firma del Asesor 

Nombres y Apellidos del asesor Manuel Jesús Luna Hernández

DNI: 06897800

ÍNDICE

RESUMEN 1
ABSTRACT 2
I. INTRODUCCIÓN 3
I.1. Planteamiento del problema 3
I.2 Formulación del problema 5
I.3. Objetivos de la investigación 5
I.4. Justificación 6
I.5. Limitaciones de la Investigación 8
II. MARCO TEÓRICO 9
II.1. Antecedentes de la investigación 9
II.2. Bases teóricas 14
II.3. Definición de términos básicos 35
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES 37
III.1. Formulación de hipótesis principal y derivadas 37
III.2. Variables 37
III.3. Operacionalización de las variables 38
IV. MATERIALES Y MÉTODOS 40
IV.1. Metodología 40
IV.2. Diseño metodológico 41
IV.3. Diseño experimental y observacional 41
IV.4. Procedimientos, Técnicas e instrumentos de recolección de información 43

IV.5. Análisis estadísticos 54

IV.6. Consideraciones éticas 54

IV.7. Impacto Potencial de los Resultados de la Investigación 54

V. RESULTADOS 55
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 69
VII. CONCLUSIONES 73
VIII. RECOMENDACIONES 74

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

Índice de Tablas

Tabla 1 Composición química de las rocas calizas. 16

Tabla 2 Especificaciones químicas de la cal hidratada comercial 23

Tabla 3 Granulométrica de cal hidratada comercial 23

Tabla 4 Composición química de las cáscaras de huevo 25

Tabla 5 Composición química de cal viva de cáscaras de huevo 30

Tabla 6 Composición de la cal hidratada de cáscaras de huevo 30

Tabla 7 Granulometría de la cal hidratada de cáscaras de huevo 31

Tabla 8 Características de jugo de caña de azúcar 34

Tabla 9 Diseño factorial 2 x 3 para la clarificación de jugos de caña 42

Tabla 10 Preparación de lechada de cal 43

Tabla 11 Resultados de la calcinación de cáscaras de huevo 57

Tabla 12 Resultados de la clarificación de jugos de caña de azúcar 59

Tabla 13 Cuadro comparativo de características de la cal comercial y cal de cáscaras de huevo 62

Índice de Figuras

Figura N°1: Imagen de la Roca caliza. La imagen muestra el espécimen de roca caliza de Eisco 16

Figura N°2: Diagrama de flujo del proceso de producción de cal hidratada. 18

Figura N°3: Imagen de un triturador de roca caliza..... 19

Figura N°4: Hornos de calcinación de lecho mixto..... 20

Figura N°5: Análisis termogravimétrico (DTG) de la roca caliza..... 21

Figura N°6: *Curvas de* TGA de rocas calizas..... 21

Figura N°7: Métodos de despacho de cal comercial..... 22

Figura N°8: Partes del huevo 24

Figura N°9: Diagrama de flujo para la producción de cal hidratada (Método 1) 26

Figura N°10: Diagrama de flujo para la producción de cal hidratada (Método 2) 28

Figura N°11: Imagen del tallo largo de caña de azúcar 32

Figura N°12: Proceso de producción de azúcar de caña..... 32

Figura N°13: Descomposición térmica de la sacarosa. 35

Figura N°14: Diagrama de flujo para la obtención de cal hidratada. 44

Figura N°15: Lavado y desinfección de cáscaras de huevo. 45

Figura N°16: Procedimiento de secado de las cáscaras de huevo. 46

Figura N°17: Proceso de molienda de las cáscaras de huevo 46

Figura N°18: Etapa de tamizado de cáscaras de huevo 47

Figura N°19: Proceso de calcinación de cáscaras de huevo molidas. 48

Figura N°20: Apagado de cal de cáscaras de huevo. 48

Figura N°21: Secado de pasta de la cal de cáscaras de huevo..... 49

Figura N°22: Envasado de la cal de cáscaras de huevo 49

Figura N°23: Imagen del jugo de caña de azúcar. 50

Figura N°24: Acondicionamiento de jugo de caña para la clarificación 51

Figura N°25*:* Preparación de lechada de cal. 51

Figura N°26: Proceso de clarificación de jugo de caña de azúcar. 52

Figura N°27: Centrifugación de jugo de caña de azúcar clarificado. 53

Figura N°28: Instrumentos empleados en la caracterización del jugo de caña clarificado 53

Figura N°29: Jugos clarificados con lechada de cal al 2,5% 60

Figura N°30: Jugos clarificados con lechada de cal al 5% 61

Figura N°31: Jugos clarificados con lechada de cal al 7,5% 61

Figura N°32: Análisis ANOVA para pH final vs Tipo de cal y concentración de lechada de cal 63

Figura N°33: Análisis ANOVA para % Brix vs Tipo de cal y concentración de lechada de cal. 64

Figura N°34: Análisis ANOVA para Turbidez vs Tipo de cal y concentración de lechada cal .. 64

Figura N°35: Gráfica de efectos principales y gráfica de interacción del tipo de cal y la concentración (%m/v) sobre la turbidez. 65

Figura N°36: Gráfica de efectos principales y gráfica de interacción del tipo de cal y la concentración (%m/v) sobre %Brix. 67

Figura N°37: Gráfica de efectos principales y gráfica de interacción del tipo de cal y la concentración (%m/v) sobre el pH final. 68

RESUMEN

El óxido de calcio es comercialmente conocido como la cal, y se obtiene a partir del procesamiento de la roca caliza. Es considerado uno de los principales y más importante aditivo de la clarificación de jugo de caña de azúcar, por lo que, el crecimiento de esta industria genera un aumento en la demanda de este producto. Sin embargo, la explotación de los recursos naturales, como la roca caliza, impacta negativamente al medio ambiente vulnerando su sostenibilidad, por lo tanto, encontrar nuevas tecnologías eficaces que disminuya esta realidad se torna una necesidad.

La cal obtenida a partir de cáscara de huevo se presenta como una alternativa ecológica, por derivar de un residuo orgánico, y viable para la industria azucarera por su alto contenido de CaO. Para evaluar su eficacia es necesario realizar un análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida a partir de cáscara de huevo para una posible optimización de la clarificación de jugo de caña de azúcar. En primer lugar, se plantea determinar los parámetros experimentales más importantes qué influyen en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscara de huevo, mediante recolección de información documental y bibliográfica. Seguidamente, se busca determinar las eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando la cal comercial y la de la cascara de huevo, mediante análisis fisicoquímicos que proporcionen los indicadores como turbidez, color, ºBrix y pH. Finalmente, se identificarán las diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando los dos productos, mediante un cuadro comparativo y pruebas estadísticas. Se espera que los parámetros experimentales más importantes sean la temperatura y el pH. También, se espera que el uso de la cal comercial y la obtenida a partir de cáscara de huevo tengan altas eficiencias en el proceso de clarificación.

Palabras clave: Cáscara de huevo, Cal, Caña de azúcar, Clarificación, Calcinación

ABSTRACT

Calcium oxide, commercially known as lime, is obtained from the processing of limestone. It is considered one of the main and most important additives in the clarification of sugarcane juice, so the growth of this industry generates an increase in demand for this product. However, the exploitation of natural resources, such as limestone, negatively impacts the environment, jeopardizing its sustainability. Therefore, finding new, effective technologies to mitigate this situation becomes necessary.

Lime obtained from eggshells is presented as an ecological alternative, as it is derived from an organic waste, and viable for the sugar industry due to its high CaO content. To evaluate its effectiveness, a comparative analysis between commercial lime and lime obtained from eggshells is necessary for a possible optimization of sugarcane juice clarification. First, the objective is to determine the most important experimental parameters that influence sugarcane juice clarification using commercial lime and lime obtained from eggshells, by collecting documentary and bibliographic information. Next, the objective is to determine the clarification efficiencies of sugarcane juice using commercial lime and eggshell lime through physicochemical analyses that provide indicators such as turbidity, color, oBrix, and pH. Finally, significant differences in sugarcane juice clarification using the two products will be identified through a comparative table and statistical tests. The most important experimental parameters are expected to be temperature and pH. Furthermore, the use of commercial lime and eggshell lime are expected to yield high clarification process efficiencies.

Keywords: Eggshell, Lime, Sugarcane, Clarification, Calcination

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Planteamiento del problema

Determinación de problema

La explotación de recursos naturales, como fuente de materia prima es uno de los principales problemas de la actualidad con relación a la sostenibilidad del medio ambiente. Diversas industrias utilizan la roca caliza en forma de carbonato (calcita) para sus procesos. Una de las industrias donde se aplica este insumo es la industria azucarera, ya que participa en la clarificación del jugo de caña. Es considerada una etapa crítica en el proceso de fabricación de azúcar refinado debido a que influye en el rendimiento y características del producto final (Matute, Bedoya, & Feo, 2012).

En la producción del azúcar, el consumo de cal, obtenida a partir de la calcita puede llegar hasta 0,65 Kg CaO aprovechable/tonelada de caña molida (Cabrera, Herrera, & Gómez, 2020), por lo que el descenso de la calidad de la roca caliza ocasiona un aumento en la demanda de la cal comercial, resultando en un incremento de costos.

En los últimos 10 años, el sector de la caña de azúcar en el Perú ha incrementado su capacidad agrícola hasta las 83000 hectáreas, y alcanzando rendimientos entre 125-130 toneladas de caña de azúcar por hectárea (Carrasco, 2024).

Se estima que para el año 2025, la producción de azúcar se incremente en 4% respecto al año anterior (Rodriguez, 2024). Por ello, existe una creciente demanda de cal en este rubro.

En el mundo se consumen alrededor de 630 mil millones de toneladas de roca caliza al año y solo en el Perú se procesa más de 30 millones de toneladas anuales (IIMP, 2024). Sin embargo, la extracción de roca caliza ocasiona la erosión de los suelos y pérdida de vegetación, lo cual genera alteraciones en los paisajes. Esto último en conjunto con los ruidos ocasionados por las

operaciones mineras desemboca en la perdida de hábitats y un impacto negativo en la fauna local. Adicionalmente, la exposición a las partículas de polvo tóxico durante la explotación de este recurso y su posterior procesamiento afecta a los animales y poblaciones aledañas, causando enfermedades respiratorias graves como el asma (Geoinnova, 2016).

Además, en el ciclo de la cal, durante la calcinación de caliza para la obtención de cal viva conlleva a la emisión de CO_2 que contribuye al calentamiento global y cambio climático, generando huella de carbono (EULA, 2021).

Por otra parte, otro reto que enfrenta la sociedad es el reaprovechamiento de residuos, como por ejemplo las cáscaras de huevo. En la actualidad, las granjas de huevos, los centros de crianza de pollos, las fábricas de alimentos y el consumo de este alimento en el hogar generan millones de toneladas de cáscaras de huevo anualmente. El manejo de estos desechos no solo representa un problema económico, sino que también suscita ciertas inquietudes ecológicas, como la posibilidad de diseminación de virus y patógenos (Mahdavi, Amirsadeghi, Jafari, Niknezhad, & Bencherif, 2021).

Por lo tanto, una alternativa es el uso de cal obtenida de cáscara de huevo, el cual es un producto rico en $CaCO_3$, y se convierte en un potencial sustituto de la cal comercial (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010). Además, es una opción que promueve la valorización de residuos y la sostenibilidad, ya que el impacto al ambiente es bastante reducido, disminuyendo en más del 50% la ecotoxicidad que provoca la cal que es obtenida a partir de procesos intensivos de extracción (Saldanha, Da Rocha, & Caicedo, 2021). También, su alta pureza conlleva a un incremento en la eficiencia con disminución en el desgaste de equipos y las incrustaciones en tuberías en comparación de la cal comercial (Granito, 2021).

I.2 Formulación del problema

Problema General

¿Será posible realizar el análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida de cáscaras de huevos para ser utilizada en la clarificación del jugo de caña de azúcar con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH)?

Problemas específicos

- ¿Cuáles son los factores más importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que influyen en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos?

- ¿Cuáles son las eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH)?

- ¿Cuáles son las diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cascarás de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH)?

I.3. Objetivos de la investigación

Objetivo general

Realizar un análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida a partir de cascará de huevo para optimizar la clarificación del jugo de caña de azúcar con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).

Objetivos específicos

- Determinar los factores importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que influyen en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos.

- Determinar las eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ^{o}Brix y pH).

- Identificar las diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ^{o}Brix y pH).

I.4. Justificación

Importancia de la investigación

Ante la creciente demanda de recursos naturales como la roca caliza, fuente de carbonatos de calcio y donde se obtiene la cal comercial, surge la necesidad de encontrar nuevas opciones para disminuir la explotación de los mismos. Por esto motivo, la cal obtenida a partir de cáscara de huevo contribuiría para la disminución del uso de la cal comercial proveniente de la explotación de recursos. Esto ayudaría a la sostenibilidad del medio ambiente en el futuro. La cal obtenida a partir de cáscara de huevo se presenta como una alternativa en la industria azucarera en la clarificación de jugo de caña.

La cal obtenida a partir de cáscara de huevo no solo contribuye con el medio ambiente al disminuir la extracción de la roca caliza y la contaminación de su posterior procesamiento, si no

también aporta a la reutilización de residuos provenientes de la industria avícola y la producción de alimentos. El aprovechamiento de las cáscaras de huevos como cal es un ejemplo de economía circular al obtener un producto valioso para la industria azucarera.

El alto contenido de $CaCO_3$ en las cáscaras de huevos origina la obtención de cal de alta calidad similar a la obtenida de piedra caliza, pero con menores porcentajes de impurezas como el SiO_2, MgO, K_2O y Al_2O_3. Estos últimos disminuyen la eficiencia del proceso de clarificación del jugo de caña de azúcar, al formar sales indeseadas. Adicionalmente, al tratarse de un residuo orgánico, el precio como materia prima para la producción de cal es bastante reducido en comparación con la roca caliza, por lo que representa una disminución de costos importante para los productores azucareros.

La cal obtenida a partir de cascara de huevo ha sido utilizado en diversas investigaciones como alternativa a la cal comercial en el tratamiento de suelos y materiales, demostrando alta eficiencia. Sin embargo, aún no se ha utilizado como aditivo químico en la clarificación de jugo de caña. Por ello, en la presente investigación se realizará un análisis comparativo que permita establecer a la cal obtenida a partir de cáscara de huevo como sustituto de la cal comercial en la industria azucarera.

Viabilidad de la investigación

Los trabajos experimentales necesarios para esta investigación se realizarán en la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos donde se dispone del laboratorio adecuado, instrumentos y equipos necesarios. Además, se cuenta con herramientas como laptop, celular e internet requeridos para una adecuada revisión documentaria y bibliográfica. En el aspecto técnico, ya se ha demostrado que se obtiene la cal de alta pureza a partir de cáscaras de huevo, por lo que, es factible de evaluar y comparar su desempeño en la

clarificación de jugos de caña de azúcar.

I.5. Limitaciones de la Investigación

Limitaciones de alcance

La comparación de la cal de cáscaras de huevo con la cal comercial en la clarificación de jugos de caña de azúcar se realizará solo a partir de la trituración de la caña, fijando los parámetros de pH inicial de jugo de caña, temperatura y tiempo de sedimentación. La clarificación de muestras de jugo de caña obtenidos de ingenios azucareros no será considerada en esta investigación por las restricciones que las empresas peruanas ofrecen para acceder a ellas.

La utilización de la cal hidratada comercial será simulada con hidróxido de calcio con 99% de pureza proporcionado por la facultad de química e ingeniería química de la UNMSM, debido a que actualmente el producto se encuentra fiscalizado por la SUNAT, según Decreto Supremo N° 268-2019-EF y en el Decreto Legislativo N° 1103, como se evidencia en el ANEXO 5.

II. MARCO TEÓRICO

II.1. Antecedentes de la investigación

Beck, K., et al., 2010, en su estudio *"On the use of eggshell lime and tuffeau poder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes"*, investigaron la compatibilidad de la cal obtenida de la cáscara de huevo y residuos de cantera con las obras de restauración haciendo una comparación con la cal proveniente de roca caliza de toba. Los estudios de caracterización de la cal comercial (CL) y la obtenida de cáscara de huevo (ESL) se realizaron mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y determinaron que la ESL contiene un 72,33% de CaO con trazas de MgO, Na_2O y P_2O_5. Además, afirmaron que la ESL es más pura que la CL a pesar de contener niveles similares de CaO debido al origen de estos productos. La cal comercial es producida de la calcinación de rocas calcáreas, por lo que siempre contiene impurezas en relación a la proporción de portlandita presente en ellas. Adicionalmente, obtuvieron $Ca(OH)_2$ a partir de la adición de agua a la cáscara de huevo descarbonizada (CaO) y un posterior secado a 105℃. Este producto presenta pureza (97,1), densidad (2,26) y colores similares a la cal hidratada comercial

Saldanha, R., et al., 2021, en su estudio *"Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization"*, Realizaron la caracterización físico-química de la cal obtenida de la cáscara de huevo mediante indicadores como la gravedad especifica, área superficial especifica y la finura de partícula, para lo cual se utilizaron los métodos ASTM D854, Adsorción de nitrógeno BET y ASTM C977, respectivamente. Determinaron que este producto presenta una gravedad especifica de 2,09 g/cm3 con retención del 35% en el tamiz malla N.º 200 y un área superficial especifica de 4,80 m^2/g en forma de cal hidratada. Los autores indicaron que estos resultados pueden ser mejorados según los métodos de molienda empleados. Adicionalmente,

efectuaron la caracterización mineralógica mediante difracción de rayos X. Encontraron que la cal obtenida de la cáscara de huevo contiene 97,0 % de óxido de calcio y 2,0 % de óxido de magnesio en la forma de cal viva y un 89,6 % de hidróxido de calcio, un 2,9 % de hidróxido de magnesio y un 5 % de carbonato de calcio en forma de cal hidratada, que mostraron mejoras en la resistencia y rigidez del suelo. También se estudió los impactos ambientales de la cal obtenida de la cáscara de huevo y la cal comercial mediante un análisis de ciclo de vida (ACV). Los autores afirmaron que existe una reducción del 65,1% de la ecotoxicidad cuando se utiliza cal viva y un 50% con la cal hidratada a partir de cáscara de huevo en comparación con la cal comercial que involucra la extracción y el posterior procesamiento de la roca caliza

Meneguz, B., et al., 2024, en su estudio *"Comparison Between Eggshell Lime and Commercial Limeas a Soil Stabilizing Agent"*, compararon la resistencia a la compresión libre (compresión uniaxial) del suelo utilizando la cal de cáscara de huevo y cal dolomítica comercial como agentes estabilizantes (aditivos). Realizaron la caracterización de la cal de cáscara de huevo mediante análisis de difracción de rayos X, donde determinaron que el producto contiene en su mayoría hidróxido de calcio (94,5%). Utilizaron como parámetro de grado de estabilización de los suelos a la relación porosidad/cal, y mostraron que el aumento de cal y disminución de porosidad aumentaba la resistencia de los suelos a la compresión uniaxial. Los autores afirmaron que la cal de cáscara de huevo forma enlaces más fuertes en el producto final, debido a la alta formación de geles y una malla cristalina formada por silicato de calcio, aluminato de calcio y silicato de aluminato de calcio, proporcionando al suelo una mayor resistencia que la alcanzada con la cal dolomítica.

Doherty, W., et al., 2002, en su estudio "The effect of liming conditions in juice clarification", realizaron un análisis de las condiciones del uso de cal en la clarificación de jugos de caña de azúcar mediante revisión bibliográfica. Indicaron que se obtiene mejores resultados en la calidad del jugo de caña cuando se adiciona la cal con un tratamiento intermedio (72℃ - 76℃) o caliente (100℃), ya que se disminuye la carga final de partículas presentes en el jugo, lo cual favorece a la disminución de incrustaciones en las operaciones unitarias siguientes. Al adicionar la cal en estas condiciones, la reacción para la formación de fosfato de calcio amorfo es espontánea y completa a un pH de 7,8. Los autores mencionan que la temperatura de operación depende de la calidad de jugo a procesar.

Abdel, H., et al., 2018, en su estudio *"The Effect of Concentration of Lime in Clarification of Cane Sugar Juice"*, estudiaron el efecto del pH en la clarificación de jugo de caña de azúcar. Utilizaron lechada de cal con densidad de 5 Be y 56 g CaO/L a distintas dosis, para obtener las mezclas de pH igual a 7, 7,5, 8 y 8,5. Determinaron las características del jugo clarificado a partir del cálculo de valores Brix, contenido de sacarosa, pureza, color, turbidez y azúcares reductores. Los autores encontraron un pH óptimo de 7, siendo que, a valores de pH inferiores, el azúcar reductor aumenta y disminuye la recuperación final del azúcar, y para un pH mayor a 7 el color y la turbidez aumentan.

Cabrera, P., et al., 2020, en su estudio *"Influencia del Uso del Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) en la Alcalinización y Sedimentación del Jugo de Caña"*, compararon la influencia del carbonato de calcio en suspensión, la lechada de cal y una combinación de estas en la clarificación del jugo de caña. Realizaron análisis de Brix, contenido de sacarosa, Pureza, Turbidez y color de los jugos clarificados, tomando en cuenta la velocidad de sedimentación y el pH de alcalinización. Los autores afirmaron que solo el carbonato de calcio no es un agente alcalinizante viable, ya que

se ve disminuida la calidad del jugo clarificado con los resultados de Turbidez de 112,40 UTF, color 321,35 UCF y un pH de 5,30. Con la adición de lechada de cal al carbonato de calcio los resultados mejoraron: Turbidez de 310,12 UTF, color 310,12 UCF y pH de 5,9. Sin embargo, los valores más óptimos fueron obtenidos con el uso de solo lechada de cal, que alcanzaron niveles más altos de alcalinidad con un pH de 7,40, Turbidez de 23,60 UTF y color 281,36 UCF.

Sewwandi, M., et al., 2021, en su estudio *"Optimizing Pre liming pH for Efficient Juice Clarification Process in sri Lankan Sugar Factories"*, estudiaron la influencia del pH en la clarificación de jugo de caña de azúcar a partir de un diseño experimental de bloques aleatorizados (RCBD), ANOVA, prueba de rango múltiple de Duncan (DNMRT) y análisis de regresión. Los parámetros de respuesta tomados en cuenta para el modelamiento matemático fueron: la turbidez, el volumen de lodo y el CaO, valores de pH de 5,44, 6,5, 7,5 y 8,5 tratados con lechada de cal. Los autores encontraron que el pH óptimo se encuentra en un rango de 7,5-8,5.

Ogando, F., et al., 2021, en su estudio *"Removal of color and turbidity in sugarcane juice treated by electrocoagulation with aluminum electrodes"*, investigaron la optimización de la clarificación de jugos de caña de azúcar utilizando la electrocoagulación, mediante análisis de variancia (ANOVA) y regresión. Los parámetros utilizados fueron: pH, temperatura, voltaje, distancia entre electrodos y sólidos solubles. Las condiciones óptimas obtenidas fueron: pH de 2,5, voltaje de 25 V, temperatura de 70 ℃, ^{0}Brix de 5 y distancia mínima de electrodo de 1 cm. Sin embargo, los autores indicaron que a estas condiciones ocurre una hidrolisis parcial de la sacarosa y formación de azucares reductores.

Mostafa, F., et al., 2023, en su estudio *"Preparation, Characterization and Application of Calcium Oxide Nanoparticles from Waste Carbonation Mud in Clarification of Raw Sugar Melt"*, investigaron la síntesis de nanopartículas de óxido de calcio a partir de residuos de lodos de

carbonatación, que se generan en la clarificación de la remolacha azucarera a partir de la combinación de métodos Limex y sol-gel, así como también la evaluación de la eficiencia en el proceso de clarificación de refinación de azúcar. A partir de los estudios de caracterización como IRTF, DRX, MEB, MET y área superficial, los autores demuestran que el producto obtenido del reaprovechamiento de residuos de lodos de carbonatación contiene un 92,81% de CaO y trazas de otros elementos, en contraste de la cal comercial que contiene 81,76% de CaO y mayores porcentajes de SiO_2, MgO, K_2O y Al_2O_3. También, los análisis muestran una morfología semihexagonal con tamaños de partícula de 60-275 nm y una alta área superficial. Los autores indicaron que se obtienen eficiencias similares a la cal comercial en los parámetros turbidez, color y ^{0}Brix, con una reducción del 32,43% en el consumo de CaO.

Venkatesh, T., et al., 2024, en su estudio *"Plant-based hydrocolloids for efficient clarification of cane juices: rheological analysis and solidification studies"*, estudiaron la eficiencia del almidón, goma xantana y goma guar en la clarificación de jugos de caña de azúcar, comparándolo con la clarificación realizada a base de cal comercial. Las variables utilizadas fueron la eficiencia de separación, eliminación de turbidez, el contenido de sacarosa y la transmitancia de color. Se encontró que el almidón indica mejores características en el jugo clarificado, mostrándose como alternativa a la clarificación de a base de cal.

Birhanua, T., et al., 2024, en su estudio *"Evaluation of Okra (Abelmoschus esculentus) Powder and Nano CaO as Alternative Clarifiers for Lime in the Processing of Sugarcane Juice"*, estudiaron la eficiencia de nanopartículas de CaO y mucílago de okra (coagulante vegetal) en la clarificación el jugo de caña, y haciendo comparación con el óxido de calcio de laboratorio. La caracterización de las nanopartículas de CaO se realizó mediante las técnicas DRX, EAAL y MEB. Los experimentos se realizaron con los diferentes clarificadores mencionados y sus mezclas,

donde los parámetros de eficiencia tomadas en cuenta fueron: la turbidez, el volumen de lodo y la velocidad de sedimentación, y tomando como variables: la cantidad de clarificador, volumen de jugo, pH, tiempo y temperatura. Los investigadores obtuvieron mejores resultados en los experimentos donde se utilizaron los clarificadores por separado, y determinaron que las nanopartículas de CaO son las más eficaces. También encontraron que el mucílago de okra (coagulante vegetal) es el clarificador menos prometedor, lo cual se ve intensificado si se mezcla con el óxido de calcio. Sin embargo, los autores afirmaron que ambos clarificadores evaluados tienen potencial de aplicabilidad en la industria, ya que se llegan a niveles altos de calidad de azúcar blanco.

II.2. Bases teóricas

II.2.1. La cal

II.2.1.1. Cal viva

La cal viva, también conocida como óxido de calcio (CaO), es un material inorgánico obtenido a partir de un proceso de calcinación, en el cual el carbonato de calcio presente es sometido a altas temperaturas (900℃ - 1000℃), por lo que absorve calor y se logra liberar dióxido de carbono (Neville, 2012), según la siguiente reacción:

$$CaCO_3 \xrightarrow{Calor} CaO + CO_2$$

II.2.1.2. Cal apagada

La cal apagada, también conocida como hidróxido de calcio, es obtenida por hidratación de la cal viva. Este proceso ocurre gracias a la alta reactividad entre el óxido de calcio (CaO) y el agua (H_2O), resultado en la formación de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) y liberación de calor (Mehta & Monteiro, 2014) según la siguiente reacción:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Calor$$

El apagado de cal viva se puede realizar a través de 3 métodos:

- Apagado en seco: Es el proceso más empleado en la industria. En este método se adiciona agua de forma estequiométrica, por lo que el resultado será cal hidratada en forma de polvo (Neville, 2012).
- Apagado en pasta: En este método se adiciona un volumen de agua un poco mayor a la estequiométrica (30-60%), resultado en la formación de cal apagada en pasta (Jiménez Delgado & Guerrero, 2007).
- Apagado por inmersión: En este método se introduce la cal viva a un volumen de agua mayor al 100% del requerido estequiométricamente (Villalba & Rodríguez, 2019).

II.2.1.2.1. Cal comercial

Origen

La cal comercial proviene de la calcinación de la roca caliza conformada por los minerales, como por ejemplo, la calcita, el aragonita y la vaterita, los cuales son minerales abundantes y ricos en carbonato de calcio que son formados por sedimentación de restos biológicos marinos o por precipitación del compuesto químico presente en el mar o lagos. Si bien el porcentaje de carbonato de calcio es alto y variable, por la misma naturaleza de la roca caliza, se pueden encontrar impurezas como: arcillas, sílice, óxidos de hierro o magnesio (Wahab, 2018).

La roca caliza puede llegar a tener niveles superiores al 90% en el contenido de carbonatos de calcio. Sin embargo, también existen impurezas como el SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 y MgO en niveles menores al 10 % dependiendo la calidad del mineral (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010). En la Figura N°1 se muestra una imagen de la roca caliza.



Figura N°1: Imagen de la Roca caliza. La imagen muestra el espécimen de roca caliza de Eisco, España. Fuente: (Flores, 2019).

El contenido de oxido de calcio en las rocas calizas está en una relación aproximada de 2:1 luego del proceso de calcinación a altas temperaturas como se observa en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Composición química de las rocas calizas.

Tipo	%CaO	$\%Al_2O_3$	$\%Fe_2O_3$	%MgO	$\%H_2O$	%L.O. I
Roca caliza	55,56	0,14	0,16	0,11	0,11	43,70

Nota. La tabla muestra la composición química de las rocas calizas de El Minia, Egipto. Fuente: (Wahab, 2018)

Tipos de cal comercial

Existen distintos tipos de cal comercial que se ofrece en el mercado peruano, en función a satisfacer las necesidades para distintas aplicaciones. Por lo que, el porcentaje de hidróxido de calcio y los aditivos que se incorporan definen las propiedades finales del producto (PROCASAC, 2025).

- Cal de obra: La cal de obra está compuesta principalmente de óxido de calcio y carbonato de calcio. Es comúnmente utilizada en aplicaciones constructivas en la estabilización de suelos.
- Cal nieve: La cal nieve contiene aproximadamente entre 15-39% de hidróxido de calcio y el resto de carbonato de calcio con impurezas como el óxido de magnesio o silicatos. Es usada para la neutralización de suelos ácidos, impermeabilización, pintura, etc.
- Cal Hidráulica: La cal hidráulica contiene una mezcla de hidróxido de calcio y materiales puzolánicos adicionales a los aluminatos y silicatos que se encuentran de forma natural, como por ejemplo la arcilla. La concentración de los materiales puzolánico puede llegar hasta el 20%, dándole a la cal la propiedad de fraguar en condiciones acuáticas.
- Cal hidratada: La cal hidratada es hidróxido de calcio de alta pureza, aproximadamente un 62% CaO útil, que equivale aproximadamente un 82% de hidróxido de calcio.
- Cal aérea: La cal aérea tiene un contenido del 99% de hidróxido de calcio (grado reactivo)

Proceso de obtención de cal hidratada

La cal hidratada comercial se obtiene a partir de la roca caliza, por lo que el proceso de obtención parte desde la extracción del mineral como materia prima hasta los procesos de hidratación y envasado del producto final. La Figura N°2 ilustra el proceso de producción de la cal hidratada.

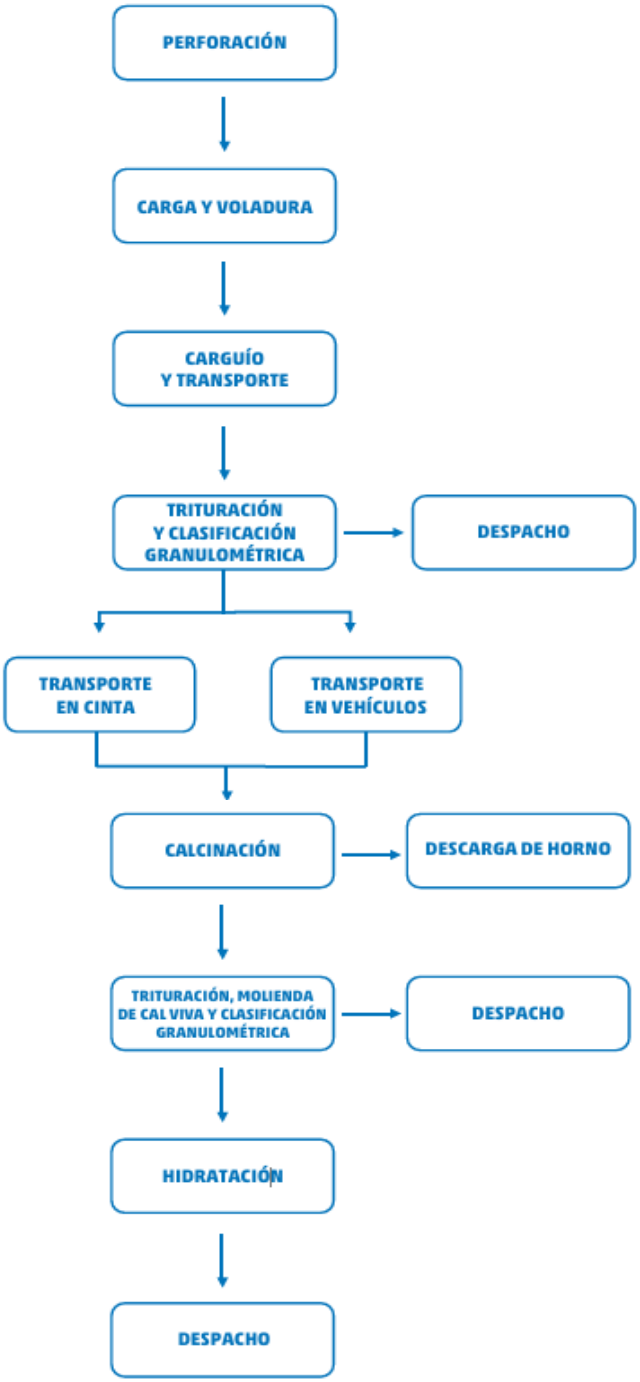


Figura N°2: Diagrama de flujo del proceso de producción de cal hidratada. Fuente: (MTEySS, 2023).

- **Perforación:** Luego de la realización de estudios geológicos para determinar la viabilidad de la extracción, se procede con la creación de los pozos en la roca para la deposición de explosivos que servirán para el siguiente proceso. Para ello, se pueden utilizar perforadores neumáticos (manual) o mecánicos (MTEySS, 2023).

- **Carga y voladura y transporte:** Se realiza la carga de explosivos en los pozos previamente perforados. Luego se realiza una detonación controlada con el objetivo de fragmentar las rocas para facilitar el tratamiento y transporte del mismo. El material explosivo a emplear varía en función a las características del material rocoso. El material fragmentado se transporta en maquinaria pesada hasta los puntos de descarga donde se dará inicio a la preparación de la piedra (MTEySS, 2023).

- **Trituración y clasificación granulométrica de roca caliza:** La roca caliza pasa por un proceso de precribado y triturado con el objetivo de reducir el tamaño de partícula. Luego se realiza la clasificación de los tamaños de partículas en tamizajes primarios y secundarios de acuerdo a las necesidades del mercado (despacho). Parte del material triturado, con tamaño de partícula definido por el fabricante, es enviada a los hornos de calcinación en cintas transportadoras, como muestra la Figura N°3 (MTEySS, 2023).



Figura N°3: Imagen de un triturador de roca caliza. Fuente: (MTEySS, 2023).

- **Calcinación:** Durante la calcinación se lleva a cabo la reacción de descomposición endotérmica del carbonato de calcio, produciendo cal viva (CaO) y dióxido de carbono (CO_2). Esta etapa se realiza en hornos verticales o de lecho mixto (carbón y roca caliza), a temperaturas entre 900 ℃ – 1000 ℃, como indican en la Figura N°4.



Figura N°4: *Hornos de calcinación de lecho mixto.* Fuente: (MTEySS, 2023).

El análisis termogravimétrico muestra que la disociación de carbonato de calcio inicia en una etapa lenta a los 500℃, luego acelera cuando la temperatura alcanza niveles entre 700℃- 770℃ y se estabiliza por la conversión completa a CaO a partir de los 800℃, como se muestra en la Figura N°5 (Zemanate & Zapata, 2015).

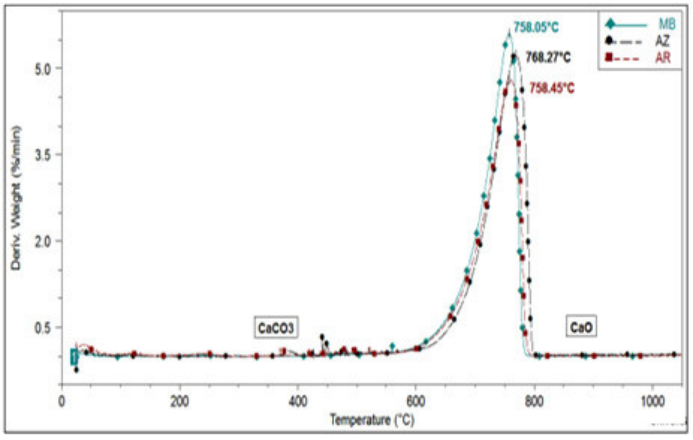


Figura N°5: Análisis termogravimétrico (DTG) de la roca caliza. La figura muestra las curvas obtenidas de termogravimetría derivativa de rocas calizas de Vijes, Colombia. Fuente: (Zemanate & Zapata, 2015).

La liberación de dióxido de carbono supone una reducción de peso de más del 39% aproximadamente como se muestra en la Figura N°6. Esto depende de la cantidad de carbonato de magnesio presente en la roca caliza, es decir, a mayor cantidad de $MgCO_3$ se obtendrá mayor porcentaje de pérdida de peso (Zemanate & Zapata, 2015).

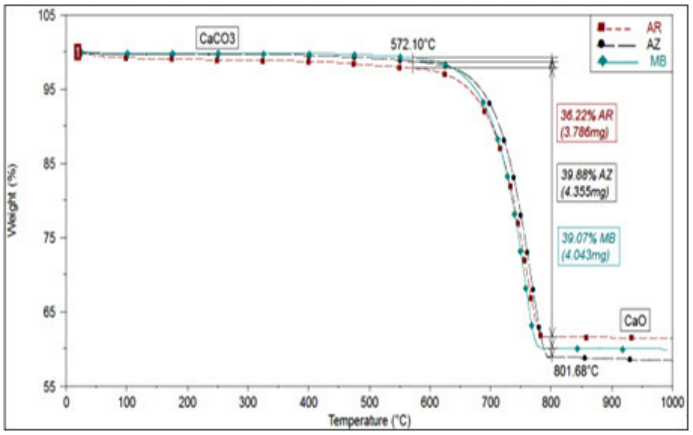


Figura N°6: *Curvas de* TGA de rocas calizas. La figura muestra los termogramas del análisis termogravimétrico de rocas calizas de Vijes, Colombia. Fuente: (Zemanate & Zapata, 2015).

- **Trituración y clasificación granulométrica de cal viva:** La cal viva pasa por trituradores para reducción de tamaño de partícula. También se realiza la clasificación granulométrica dependiendo de la disposición final del producto (Aguilar & Ramírez, 2021).

- **Hidratación:** En esta etapa se lleva a cabo la hidratación de la cal viva, también conocido como apagado de cal. Ocurre una reacción exotérmica al adicionar agua de forma

estequiométrica y controlada (apagado en seco), dando como resultado la formación de hidróxido de calcio o cal hidratada (Aguilar & Ramírez, 2021).

- **Despacho:** El producto final es despachado en bolsas de papel de 25 Kg, bolsas grandes de hasta 1,2 Toneladas o a granel como presentado en la Figura N°7 (MTEySS, 2023).



Figura N°7: Métodos de despacho de cal comercial. Fuente: (MTEySS, 2023).

Características químicas de la cal hidratada comercial

La cal hidratada comercial en el Perú ofrece una variedad de pureza entre 80%-95%, según ficha técnica de las empresas como PROCASAC y CALCESUR (Inti). Su forma de presentación es en polvo fino de color blanco. Las especificaciones químicas se muestran en la Tabla N°2.

Tabla N°2: *Especificaciones químicas de la cal hidratada comercial*

Componente Químico	Unidad	Especificación	Método de ensayo
Hidróxido de calcio Ca $(OH)_2$	%	>=80,0	NTP-334.131 / ASTM C25
Óxido de calcio útil (CaO total)	%	>=60,0	NTP-334.131 / ASTM C25
Dióxido de silicio ($Si0_2$)	%	<=5,00	NTP-334.177 / ASTM C1271
Óxido de magnesio (MgO)	%	<=1,80	NTP-334.177 / ASTM C1271
Humedad	%	<=1,50	NTP-334.131 / ASTM C25

Nota: La tabla muestra la composición química de cal hidratada ofrecida por la empresa CALCESUR. Fuente: (CALCESUR, 2025).

Características físicas de la cal hidratada comercial

La cal hidratada es un polvo fino blanco, inoloro, incombustible, no inflamable y no explosivo. Presenta una densidad aparente de 0,30-0,50 Ton/m^3 y las características granulométricas se definen en función a la NTP-334.168, las cuales se muestran en la Tabla N°3.

Tabla N°3: Granulométrica de cal hidratada comercial

N° de Malla	Unidad	Valor	Método de ensayo
Retenido. 30 (0,600 mm)	%	<=3,00	NTP-334.168 / ASTM C110
Retenido. 200 (0,075 mm)	%	>=7,00	NTP-334.168 / ASTM C110

Nota: La tabla muestra la granulométrica de cal hidratada ofrecida por la empresa CALCESUR. Fuente: (CALCESUR, 2025).

II.2.1.2.1. Cal de cáscaras de huevo

Origen: El huevo

El huevo es un alimento con alto valor nutricional, ya que contiene un balance adecuado de carbohidratos, grasas, proteínas, vitaminas y minerales. Las proteínas que se encuentran en el huevo son de alta calidad debido a la abundancia de aminoácidos esenciales. Este alimento es una excelente fuente de minerales, destacando el zinc, el calcio, el yodo, el fósforo y el potasio. Además, el huevo proporciona una buena cantidad de vitaminas, tales como la riboflavina, la biotina, el ácido pantoténico y las vitaminas liposolubles A, D y E (Vázquez C. , 2020). En la Figura N°8 se muestra las partes del huevo, donde resalta la yema, la cáscara y la albúmina.



Figura N°8: Partes del huevo, donde se aprecia la yema, la cáscara y la albúmina. Fuente: (El sitio avicola, 2013).

- **Cáscara protectora:** Estructura compuesta en su mayoría por calcio y fosfato que usualmente se transforma en desecho.
- **Membrana interior de la cáscara:** capa delgada de estructura fibrosa compuesta en su mayoría por proteínas.
- **Clara de huevo o Albúmina:** fuente importante de proteínas y péptidos bioactivos.

- **La yema:** Parte central que contiene principalmente lípidos con trazas de proteínas, polisacáridos, minerales y vitaminas.

Caracterización de las cascaras de huevo

La cascara de huevo representa aproximadamente el 10% del peso total del huevo. En la parte interna lleva adherida una delgada película fibrosa constituida por múltiples biopolímeros incluyendo el ácido hialurónico y el colágeno. Por otra parte, la cáscara de huevo está compuesto por principalmente por carbonato de calcio (94%), como se muestra en la Tabla N°4 (Mahdavi, Amirsadeghi, Jafari, Niknezhad, & Bencherif, 2021).

Tabla N°4*:* Composición química de las cáscaras de huevo

Compuesto	Cantidad
Carbonato de calcio ($CaCO_3$)	94%
Materia orgánica	4%
Fosfato de calcio ($Ca_3(PO_4)_2$)	1%
Carbonato de magnesio ($MgCO_3$)	1%
Sodio (Na)	1512 ppm
Estroncio (Sr)	320 - 411ppm
Potasio (K)	524 ppm
Azufre (S)	589 ppm

Fuente: (Mahdavi, Amirsadeghi, Jafari, Niknezhad, & Bencherif, 2021).

Proceso de obtención de cal hidratada a partir de cáscaras de huevo

La obtención de óxido de calcio de las cáscaras de huevo se puede realizar en solución o calcinación directa. Debido a esto, la producción de cal hidratada puede realizarse mediante 2 métodos.

Cal hidratada proveniente de óxido de calcio en solución (Método 1): En este método se realiza la calcinación 2 veces. La primera sirve para separar la fase carbonato de calcio, y la segunda para obtener el óxido de calcio (CaO), tal como se muestra en la Figura N°9.

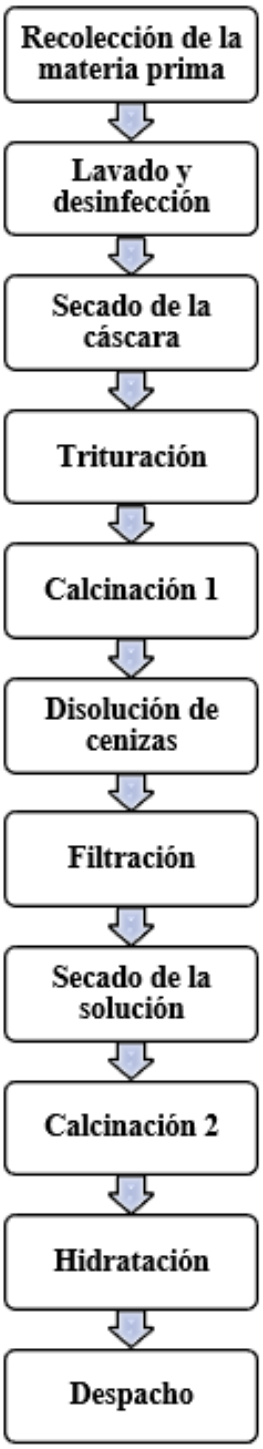


Figura N°9: Diagrama de flujo para la producción de cal hidratada (Método 1). Fuente: (Vázquez, Henkel, Legorreta, Barrientos, & Urbano, 2021).

- **Lavado y desinfección de materia prima:** En esta etapa se libera a las cascaras de huevo de los contaminantes presentes en su parte externa y los residuos de clara que quedaron adheridos. También se remueve la membrana fibrosa presente en la parte interna. Las cáscaras de huevo se desinfectan con ácido clorhídrico o vinagre al 5% en el rango de 15-30 min.
- **Secado de las cáscaras:** Las cáscaras de huevo lavadas son secadas en estufa a 60℃ por 4 horas o a temperatura ambiente por 24 h.
- **Molienda**: En esta etapa se lleva a cabo la molienda de las cáscaras de huevo con el objetivo de reducir el tamaño de partícula para valores menores que 75 micras. A nivel laboratorio se puede utilizar mortero.
- **Calcinación 1:** Las cáscaras de huevo son calcinadas a 600 ℃ por 4 h. En esta etapa se obtiene carbonato de calcio en mayor pureza.
- **Disolución con ceniza:** La ceniza se disuelve con ácido acético o ácido clorhídrico.
- **Filtración:** La solución es filtrada permitiendo separar el carbonato de calcio disuelto de la materia orgánica presente en la ceniza (no eliminada en la calcinación).
- **Secado de solución:** La solución filtrada se seca en una estufa a 100℃ por 24 h para obtener carbonato de calcio en polvo.
- **Calcinación 2:** El carbonato de calcio en polvo es sometido a calcinación a 800℃ por 2 h para su conversión a óxido de calcio.
- **Hidratación:** Se adiciona agua de forma controlada al óxido de calcio (apagado en seco) para obtener hidróxido de calcio o cal apagada en polvo.

Cal hidratada proveniente de óxido de calcio de calcinación directa (Método 2): En este método ocurre solo una etapa de calcinación a temperaturas más elevadas (900℃ - 1200℃). El procedimiento detallado se muestra en la Figura N°10.

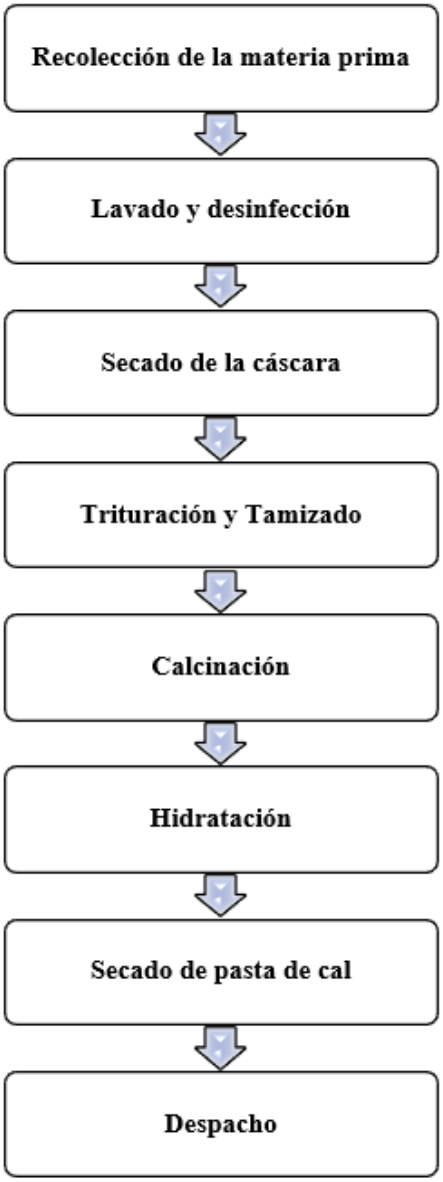


Figura N°10: Diagrama de flujo para la producción de cal hidratada (Método 2). Fuente: (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010).

- **Lavado y desinfección:** En esta etapa se libera a las cascaras de huevo de los contaminantes presentes en su parte externa y los residuos de clara que quedaron adheridos. También se remueve la membrana fibrosa presente en la parte interna. Las cáscaras de huevo se desinfectan con ácido clorhídrico o vinagre al 5% en el rango 15-30 min.
- **Secado de las cáscaras:** Las cáscaras de huevo lavadas son secadas en estufa a 60℃ por 4 horas o a temperatura ambiente por 24 h.
- **Trituración y tamizado:** En esta etapa se lleva a cabo la trituración de las cáscaras de huevo con el objetivo de reducir el tamaño de partícula. Luego se pasa por un tamiz N° 200 para obtener un polvo fino y homogéneo.
- **Calcinación:** La cáscara de huevo en polvo es sometido a calcinación a 1000℃ por un periodo de 2-3 h para su conversión a óxido de calcio.
- **Hidratación:** Se adiciona agua en un volumen un poco mayor al estequiométrico hasta formar una pasta. Luego se deja reposar por 30 min para asegurar que todo el óxido de calcio haya reaccionado y formado hidróxido de calcio. La agitación es importante para promover la homogenización.
- **Secado de pasta de cal:** La pasta obtenida es secada a 105℃ hasta eliminar el exceso de agua. Luego se obtiene cal hidratada en polvo.

Características químicas de la cal hidratada de cáscaras de huevo

El alto contenido de carbonato de calcio en las cascaras de huevo, permite obtener porcentajes aprovechables de CaO como se muestra en la Tabla N°5, los cuales son muy similares o superiores a la cal comercial de la roca caliza (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010).

Tabla N° 5: Composición química de cal viva de cáscaras de huevo

Tipo	%CaO	%Na_2O	%P_2O_5	%MgO	%K_2O	%L.O. I
Cal viva de Cáscara de huevo	72,33	0,16	0,23	0,84	0,07	24,22

Nota. La tabla muestra la composición química de cal viva luego de calcinar cáscaras de huevo a 1000℃. Fuente: (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010).

Por consiguiente, la cal hidratada de cáscaras de huevo presenta niveles altos de hidróxido de calcio, superiores al 90% como se muestra en la Tabla N°6.

Tabla N°6: Composición de la cal hidratada de cáscaras de huevo

Compuesto	(Meneguz, Nierwinski, & Caetani, 2024)	(Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010)
$Ca(OH)_2$	94,5	97,1
$CaCO_3$	5,5	-

Nota. La tabla muestra la composición química de la cal hidratada obtenida en dos investigaciones. Fuente: Elaboración propia.

Características físicas de la cal hidratada de cáscaras de huevo

Una de las características más importantes para describir a la cal hidratada es su área de superficie especifica, debido a que indica el espacio disponible para que ocurra las reacciones químicas. La cal hidratada de cáscaras de huevo presenta un valor de 4,80 m^2/g. Sin embargo, esta propiedad varía en función del tamaño de partícula brindado por los métodos de molienda, por eso, es importante seleccionar el método de pulverización adecuado para cada objetivo del producto (Saldanha, Da Rocha, & Caicedo, 2021).

La cal hidratada de cáscaras de huevo tiene densidades entre 2,09 y 2,22 g/ cm^3 (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010). Además, su granulometría debe estar dentro de la normativa peruana NTP-334.168 para la cal hidratada como se muestra en la Tabla N°7.

Tabla N°7: Granulometría de la cal hidratada de cáscaras de huevo

N° de Malla	Unidad	Valor	Especificación
Retenido. 30 (0,600 mm)	%	0	<=3,00
Retenido. 200 (0,075 mm)	%	35	>=7,00

Nota: La tabla muestra la granulométrica de cal hidratada de un caso de estudio. Fuente: (Saldanha, Da Rocha, & Caicedo, 2021).

II.2.2. Jugo de caña de azúcar

II.2.2.1. Caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) es uno de los principales cultivos en el mundo, debido a su variedad de aplicación industrial. Además de la producción de azúcar, es aplicada en la fabricación de papel, cemento, alimento animal, bebidas, etc. La planta consta de un tallo largo, como se muestra en la Figura N°11, que almacena el azúcar y está constituida por 75% de agua, por eso se considera también como un fruto (Nayarit, 2018).



Figura N°11: Imagen del tallo largo de caña de azúcar. Fuente: (Nayarit, 2018).

II.2.2.2. Proceso de extracción de azúcar de caña

El proceso de extracción de azúcar de caña empieza con la obtención del jugo de caña de azúcar y su posterior refinamiento a través de varias operaciones como el objetivo de eliminar las impurezas (Proceso de fabricación de azúcar, s.f) como se muestra en la Figura N°12.



Figura N°12: Proceso de producción de azúcar de caña. Fuente: (APAH, s.f).

- **Cosecha:** Se extraen los tallos de las cañas de azúcar en las áreas de cultivo para ser transportados y descargados en las fajas de alimentación donde son lavados y sometidos a un pretratamiento de rotura y desfibrado mediante unas picadoras oscilantes (IPAAT, s.f).
- **Molienda:** En esta etapa se realiza la extracción del jugo de caña de azúcar, para lo cual se utilizan molinos de mazas que son accionados por turbinas. Al mismo tiempo, también se realiza la maceración del bagazo, adicionando agua para obtener el máximo contenido de sacarosa posible (CISA, s.f).
- **Clarificación:** En esta etapa se realiza la separación de las impurezas presentes en el jugo. Para ello se adiciona un agente clarificador que ayuda a la floculación y sedimentación de los sólidos insolubles. Los lodos resultantes son conocidos como cachaza y pasan a ser tratados para convertirse en abono orgánico (COAZUCAR, s.f).
- **Evaporación:** El jugo clarificado es enviado a los evaporadores con el objetivo de concentrar los sólidos solubles a un 55-60%, obteniendo la meladura (IPAAT, s.f).
- **Cristalización:** El jugo concentrado o meladura se lleva a los tachos al vacío donde ocurrirá a la formación de cristales de azúcar (CISA, s.f).
- **Centrifugación:** Etapa donde ocurre la separación de los cristales de la miel (melaza) por medio de equipos de altas velocidades de rotación. La melaza sirve como materia prima para la producción de alcohol en las destilerías (COAZUCAR, s.f).
- **Secado:** Los cristales de azúcar pasan por un secador para reducir los niveles de humedad.
- **Envasado**: El producto seco y fino es empaquetado para su despacho.

II.2.2.3. Características físicas del jugo de caña de azúcar

El jugo de caña de azúcar tiene un pH ligeramente acido con niveles altos de sacarosa como se muestra en la Tabla N°8. Además, presenta un color amarillo verdoso y alta turbidez.

Tabla N°8: Características de jugo de caña de azúcar

Parámetros	Valores
pH	4,8 ± 0,02
Acidez (mg 100/g)	186,00 ± 3,61
Solidos solubles totales (Brix)	18,07 ± 0,02
Azucares reductores (%/SST)	30,63 ± 0,65
Sacarosa (%/SST)	47,03 ± 1,69
Fosfato inorgánico (%mg/SST)	362,66 ± 1,03
Cenizas conductimétricas	1,67 ± 0,01
Color ICUMSA (UI)	47297 ± 0,02
Turbidez (NTU)	353,00 ± 1,50

Nota: Fuente: (Hamerski, Dantas, & Matar, 2011).

II.2.2.3. Factores que afectan la calidad del jugo de caña de azúcar

La calidad del jugo de caña de azúcar está determinada principalmente por su contenido de sacarosa. Sin embargo, hay sustancias químicas que pueden interferir en el procesamiento industrial y, consecuentemente, en la calidad del producto final (Larrahondo, 1995). Las principales sustancias químicas pueden ser:

- Azúcares reductores: Forman sustancias coloreadas. Su contenido depende del deterioro o falta de maduración de la planta.
- Carbohidratos oligosacáridos: Dificultan la cristalización de la sacarosa al incrementar el tamaño de cristal por alargamiento de la cadena de carbonos. Este efecto se ve impulsado por el deterioro de la caña después del corte. Ejemplos: theanderosa, gentianosa, leucrosa, etc.
- Polisacáridos: Dificultan el proceso de filtración, debido a la adherencia a los cristales de azúcar. También, algunos se hidrolizan y contribuyen al aumento de azucares reductores.
- Compuestos fenólicos: Compuestos que afectan el color del jugo al oxidarse o reaccionar con aminas (pigmentos naturales). Algunos de ellos son depurados durante la maceración del jugo de caña por su alta solubilidad en el agua. Sin embargo, existen otros compuestos

como las flavonas que influyen en el color del jugo durante la clarificación dependiendo del pH.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la descomposición térmica de la sacarosa en glucosa y fructosa, ya que la reacción de estos azucares reductores con compuestos amino-nitrogenados produce compuestos coloreados llamados melanoidinas como se muestra en la Figura N°13.

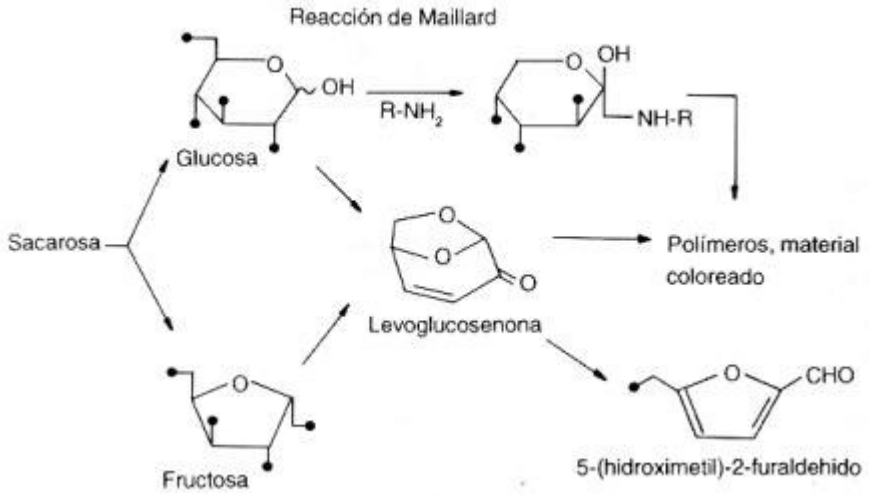


Figura N°13: Descomposición térmica de la sacarosa. La figura muestra las termólisis de la sacarosa y formación de melanoidinas. Fuente: (Shafizadek, Furneaux, & Stevenson, 1979).

II.3. Definición de términos básicos

Roca caliza: Mineral con alto contenido de carbonato de calcio ($CaCO_3$).

Carbonato de calcio: Compuesto inorgánico base para la obtención de la cal.

Cal Viva: Óxido de calcio (CaO) proveniente de la calcinación del carbonato de calcio ($CaCO_3$).

Calcinación: Proceso térmico a elevadas temperatura (800℃-1200℃) donde el carbonato de calcio se descompone en oxido de calcio y dióxido de carbono.

Cal hidratada: Hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) obtenido por reacción entre la cal viva y agua.

Cal comercial: Cal hidratada que proviene de la roca caliza mineral.

Cal de cáscaras de huevo: Cal hidratada que proviene de cáscaras de huevo.

Jugo de caña de azúcar: Zumo extraído de las cañas de azúcar mediante un proceso de molienda.

Clarificación: Etapa de eliminación de impurezas (Solidos en suspensión, coloides y compuestos no azucarados) mediante floculación.

Solidos en suspensión: Partículas no disueltas dispersas en el líquido.

Coloides: Partículas de tamaño reducido que se encuentran dispersas uniformemente y no sedimentan.

Floculación: Proceso de separación de impurezas mediante la formación de flóculos constituidos por coloides y solidos en suspensión.

Sedimentación: Proceso físico mediante el cual sustancias o partículas logran depositarse en el fondo del recipiente que los contiene por gravedad.

pH: Índice de nivel de acidez o alcalinidad de una solución.

Turbidez: Medida del nivel de partículas dispersas en el líquido que interfieren con el paso de la luz.

%Brix: Contenido porcentual de solidos solubles (sacarosa, azucares reductores, etc.).

Azucares reductores: contenido de sustancias no -sacarosas como la glucosa y fructosa.

Sacarosa: Compuesto azucarado, componente principal del azúcar de mesa.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

III.1. Formulación de hipótesis principal y derivadas

Hipótesis General

Aplicando un análisis comparativo con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH) entre la cal comercial y la obtenida de la cáscara de huevo se optimizará la clarificación del jugo de caña de azúcar.

Hipótesis específicas

- Existen factores importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que promuevan una óptima clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos.
- Se obtienen altas eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).
- Existen diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).

III.2. Variables

Variables independientes:

- **Cal obtenida de la cáscara de huevo.** Intensificador de la clarificación de jugo de caña proveniente de la calcinación de residuo orgánico (cáscara de huevo).

- **Cal comercial.** Intensificador de la clarificación de jugo de caña proveniente de la roca caliza.

Variables dependientes

- **Clarificación de jugo de caña de azúcar.** Proceso de eliminación de impurezas del liquido extraído a partir de la trituración de caña de azúcar de forma manual.

III.3. Operacionalización de las variables

Variable independiente

Cal obtenida de la cáscara de huevo

- Dimensiones
  - Caracterización
  - Cantidad
- Indicadores
  - Composición de la cal de cáscara de huevo
  - Dosis de Cal

Cal comercial

- Dimensiones
  - Caracterización
  - Cantidad
- Indicadores
  - Composición de la cal comercial
  - Dosis de Cal

Variable dependiente

Clarificación de jugo de caña de azúcar

- Dimensiones
  - Caracterización
- Indicadores
  - Turbidez
  - Color
  - ºBrix
  - pH

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. Metodología

Objetivo 1: Determinar los factores importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que influyen en la clarificación del jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos.

Se procederá a recolectar la información documental y bibliográfica de artículos científicos mediante la herramienta ScienceDirect.com, donde se identificará los factores más importantes con sus rangos de trabajo experimental de referencia que pueden influenciar en el proceso de clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal. Se determinarán los parámetros experimentales para ejecutar las pruebas experimentales del presente proyecto.

Objetivo 2: Determinar las eficiencias en la clarificación del jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).

Se procederá con la calcinación de la cáscara de huevo para la obtención de la cal, y se caracterizará el jugo de caña de azúcar previo al proceso de clarificación (color y pH). Se ajustará el pH inicial del jugo de caña a 5. La cal obtenida de cáscara de huevo y la cal comercial serán añadidas en forma de lechada de cal al jugo de caña de azúcar a una temperatura aproximada de 80℃ y se mantendrá en agitación constante por 5 min. Luego pasara a probetas de 500 ml para llevar a cabo la sedimentación por 40 min. El jugo clarificado se llevara a centrifugación. Se realizará la caracterización del jugo clarificado con los análisis fisicoquímicos donde se obtendrán los indicadores como: turbidez, ºBrix, pH y color, los cuales serán medidos a partir del turbidímetro, refractómetro y pHmetro y sensorial, respectivamente.

Objetivo 3: Identificar las diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cascarás de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).

Se realizará un cuadro comparativo entre las características fisicoquímicas del jugo de azúcar clarificado utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos. Se analizará si existen diferencias significativas entre ambos métodos mediante pruebas estadísticas.

IV.2. Diseño metodológico

Enfoque de investigación: Cuantitativo

Nivel de investigación: Aplicativo

Tipo de investigación: Experimental-Aplicativo

IV.3. Diseño experimental y observacional

Las pruebas experimentales tendrán como variables independientes: la cal obtenida de la cáscara de huevo y la cal comercial. La variable dependiente es la clarificación de jugo de caña de azúcar, la cual se caracterizará mediante la turbidez, color, ºBrix y pH.

Se realizará un diseño factorial 2 x 3 (2 niveles y 3 concentraciones de cal). Cada corrida experimental se realizará por triplicado empleando 500 ml de jugo de caña de azúcar para cada tratamiento, como se muestra en la Tabla N°9.

Tabla N°9: Diseño factorial 2 x 3 para la clarificación de jugos de caña

Experimento	A (Tipo de cal)	B (Concentración (%m/v))
1	Cal comercial	2,5%
2	Cal comercial	2,5%
3	Cal comercial	2,5%
4	Cal comercial	5%
5	Cal comercial	5%
6	Cal comercial	5%
7	Cal comercial	7,5%
8	Cal comercial	7,5%
9	Cal comercial	7,5%
10	Cal de cáscaras de huevo	2,5%
11	Cal de cáscaras de huevo	2.5%
12	Cal de cáscaras de huevo	2,5%
13	Cal de cáscaras de huevo	5%
14	Cal de cáscaras de huevo	5%
15	Cal de cáscaras de huevo	5%
16	Cal de cáscaras de huevo	7,5%
17	Cal de cáscaras de huevo	7,5%
18	Cal de cáscaras de huevo	7,5%

Nota: Fuente: Elaboración propia

El volumen de lechada de cal añadida será de 25 ml a 500 ml de jugo de caña de azúcar (5%) en cada corrida experimental.

La cal hidratada comercial será simulada con hidróxido de calcio al 99%. Para lo cual, el peso de hidróxido de calcio será equivalente al 85% del peso de cal hidratada comercial necesario para cada corrida experimental como muestra la ecuación abajo.

$$W_{hidroxido\ de\ calcio} = 0.85 \times W_{cal\ hidratada\ comercial}$$

Por lo tanto, los pesos para la cal comercial se establecen en la Tabla N°10.

Tabla N°10: Preparación de lechada de cal

A (Tipo de cal)	B (Concentración (%m/v))	Volumen total (ml)	masa Cal (g)
Cal comercial ($Ca(OH)_2$)	2,5%	25	0,53
Cal comercial ($Ca(OH)_2$)	5%	25	1,06
Cal comercial ($Ca(OH)_2$)	7,5%	25	1.59
Cal de cáscaras de huevo	2,5%	25	0,63
Cal de cáscaras de huevo	5%	25	1,25
Cal de cáscaras de huevo	7,5%	25	1,88

Nota: Fuente: Elaboración propia

Las concentraciones utilizadas son 2,5%, 5% y 7,5% m/v, es decir, 2,5 g, 5 g y 7,5 g por cada 100 ml de agua destilada respectivamente.

IV.4. Procedimientos, Técnicas e instrumentos de recolección de información

IV.4.1. Técnicas e instrumentos de recolección de información

Mediante recopilación documental y bibliográfica se determinaran las condiciones para llevar a cabo el proceso de clarificación, tales como pH, Temperatura y Tiempo de sedimentación.

El diseño factorial 2 x 3, por el cual se establecerán las corridas experimentales que se realizará en el presente trabajo de investigación.

La caracterización final del juego de caña (clarificado por la cal comercial y por la cal obtenida de las cáscaras de huevo), será realizada mediante el turbidímetro, refractómetro, pH metro y análisis visual.

IV.4.2. Procedimientos

IV.4.2.1 Obtención de cal de cáscaras de huevo

El procedimiento para la obtención de la cal es basado en el método por calcinación directa (Beck, Brunetaud, Mertz, & Al-Mukhtar, 2010). El diagrama de flujo trabajado se describe en la Figura N°14.

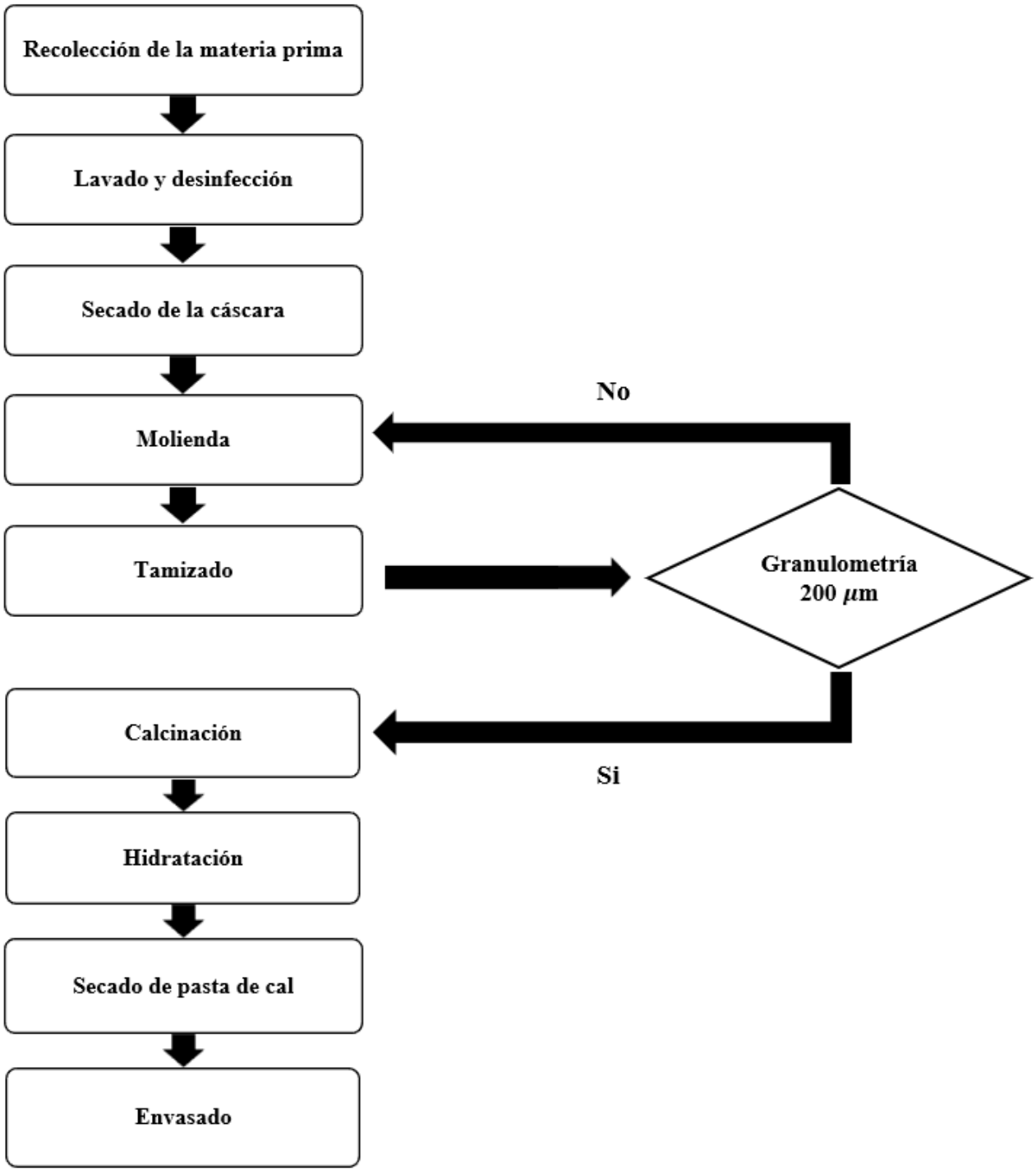


Figura N°14: Diagrama de flujo para la obtención de cal hidratada. Fuente: Elaboración propia.

Lavado y desinfección

Se realiza la limpieza de las cáscaras de huevo eliminando la materia fecal que usualmente alberga en la superficie externa. Luego se desinfecta con 2 L de vinagre al 5% v/v por al menos 30 min, para asegurar la eliminación de microorganismos presentes. En esta etapa también se realizará la separación de la membrana fibrosa que se encuentra adherida en la parte interna de la cáscara, como mostrada en la Figura N°15.



Figura N°15: Lavado y desinfección de cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

Secado de cáscara de huevo

Se realiza el secado de las cáscaras de huevo a temperatura ambiente por 12 h. Luego se emplea una estufa para completar el secado a 70℃ por 2 h como se evidencia en la Figura N°16.



Figura N°16: Procedimiento de secado de las cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

Molienda de las cáscaras de huevo

La molienda se realiza haciendo uso de un mortero durante 4 h con el objetivo de reducir el tamaño de las partículas a un valor inferior a 75 μm, como se muestra en la Figura 17.



Figura N°17: Proceso de molienda de las cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

Tamizado de las cáscaras de huevo

Las cáscaras de huevo molidas se pasan por los tamices N°140 (106 μm) y N° 200 (75 μm), como se muestra en la Figura N°18. El objetivo de esta etapa es obtener un material de tamaño de partícula homogéneo para que la calcinación sea más eficiente. Para los pasos posteriores solo se utilizará la fracción pasantes de malla N° 200 ($<$75 μm).



Figura N°18: Etapa de tamizado de cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

Calcinación

Las cáscaras de huevo tamizadas pasante en la malla N° 200 pasan a la etapa de calcinación, donde es realizada en una mufla acondicionada a 1000℃ por 2 h, donde se obtiene como producto CaO. La Figura N°19 muestra la mufla con las muestras de cáscaras de huevo calcinadas en crisoles.



Figura N°19: Proceso de calcinación de cáscaras de huevo molidas. Fuente: Elaboración propia.

Hidratación

Se empleo una relación agua/CaO 3:1 en peso para la etapa de hidratación de cal viva, el cual se realizó en un vaso de precipitado con agitación constante hasta obtener una pasta lechosa, dando lugar una reacción exotérmica y se obtiene hidróxido de calcio o cal apagada como se muestra en la Figura N°20. Se deja reposar por 30 min para completar la hidratación.

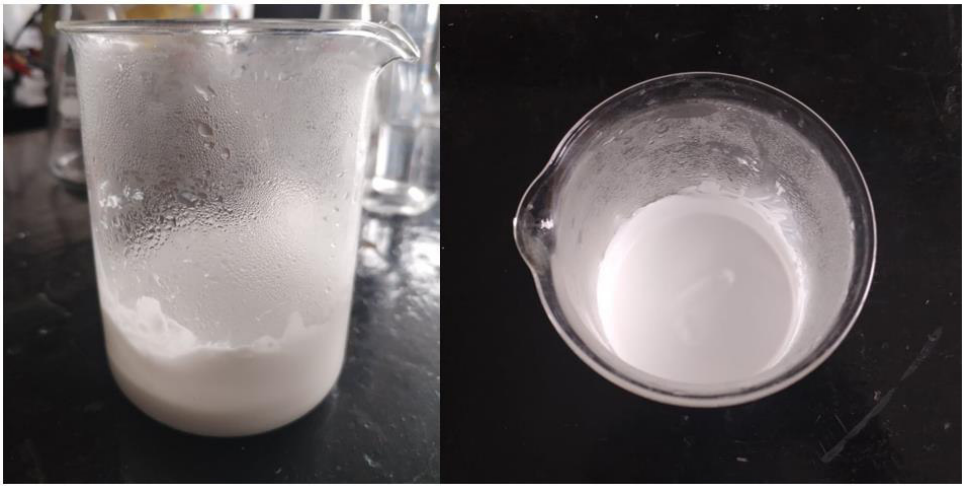


Figura N°20: Apagado de cal de cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

Secado de pasta de cal

La cal hidratada en pasta se seca a 105℃ por 17 h en una estufa hasta obtener peso constante, para eliminar el exceso de agua y obtener hidróxido de calcio en forma de polvo, como se muestra en la Figura N°21.

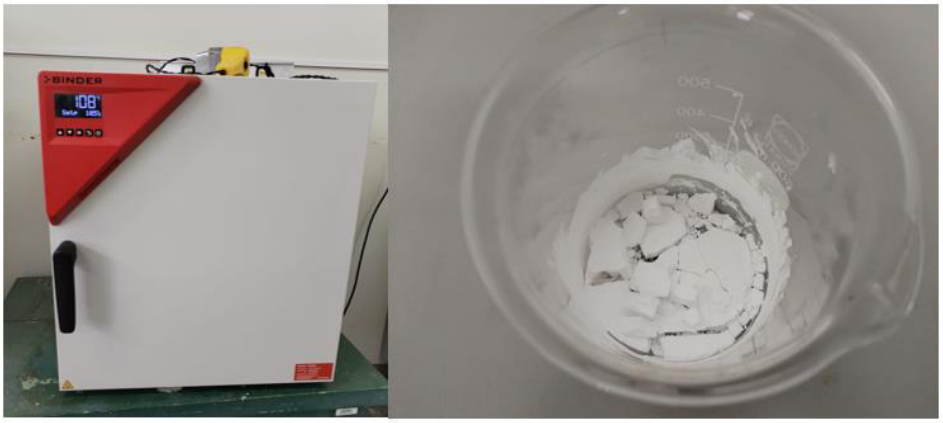


Figura N°21: Secado de pasta de la cal de cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

Envasado

La cal de cáscara de huevo obtenida se almacena en un frasco hermético, como se muestra en la Figura N°22.



Figura N°22: Envasado de la cal de cáscaras de huevo. Fuente: Elaboración propia.

IV.4.2.2 Clarificación de jugos de caña

Preparación de jugo de caña

El jugo de caña fresco es dividido en lotes de 1 L para obtener una muestra homogénea que optimice la comparación de cal comercial y cal de cáscaras de huevo. La Figura N°23 ilustra una imagen el jugo de caña de azúcar.



Figura N°23: Imagen del jugo de caña de azúcar. Fuente: Elaboración propia.

El acondicionamiento para la clarificación consta de dos fases. Primero, se regula el pH a 5 empleando solución de ácido fosfórico e hidróxido de potasio empleando un goteo con agitación constante (bagueta) mediante pH-metro PH50 VIOLAB DHS, con precisión de ±0.02 pH. Luego, el jugo de caña se calienta en una hornilla hasta los 80℃, como se muestra en la Figura N°24.

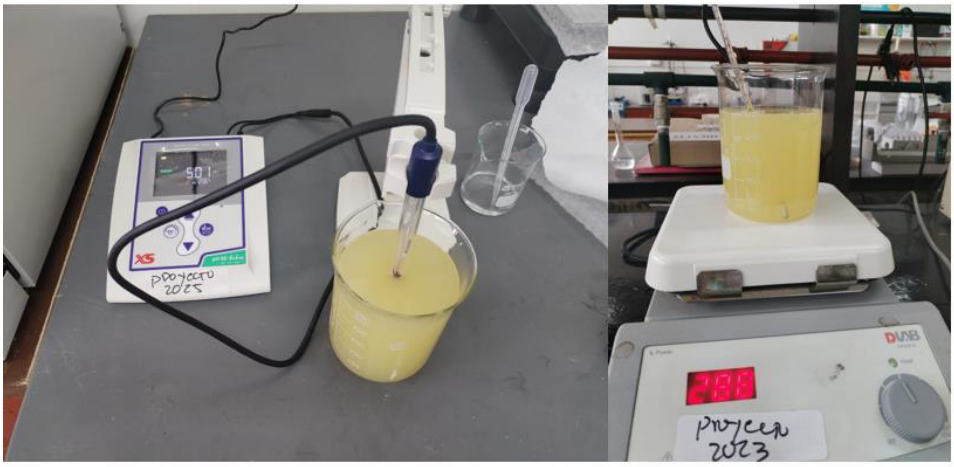


Figura N°24: Acondicionamiento de jugo de caña para la clarificación. Fuente: Elaboración propia.

Preparación de lechada de cal

Se prepara 25 ml de lechada de cal comercial y cal de cáscaras de huevo al 2,5%,5% y 7,5% m/v, según describe la Tabla 10 y como se muestra en la Figura N°25. En seguida la lechada de cal es agregada al jugo de caña de azúcar a una temperatura de 80°C con agitación constante por 5 min.

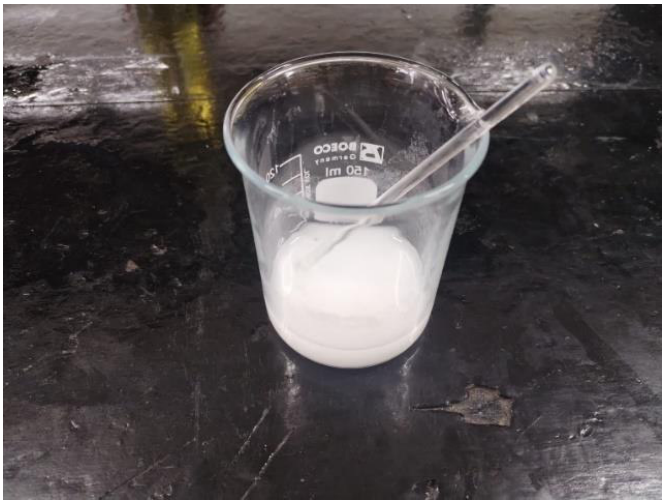


Figura N°25*:* Preparación de lechada de cal. Fuente: Elaboración propia.

Floculación y sedimentación de impurezas

El jugo de caña es vertido en probetas de 500 ml para que ocurra la sedimentación de los flóculos, por un tiempo de 40 min, como se muestra en la Figura N°26. El líquido clarificado es separado por decantación en vasos de precipitado de 250 ml correctamente rotulados



Figura N°26: Proceso de clarificación de jugo de caña de azúcar. Fuente: Elaboración propia.

Centrifugación

El líquido clarificado es centrifugado a 2000 r/min por 10 min para separar las impurezas que no llegaron a sedimentar durante el tiempo establecido, como se muestra en la Figura N° 27.



Figura N°27: Centrifugación de jugo de caña de azúcar clarificado. Fuente: Elaboración propia.

Caracterización del jugo de caña clarificado

La caracterización del jugo de caña clarificado es evaluada por el pH, la turbidez y el % Brix a partir del pH metro, del turbidímetro y del refractómetro, respectivamente, como se muestra en la Figura N°28. También se realiza una comparación visual del color obtenido a partir de la adición de cal comercial y la cal obtenida de las cáscaras de huevos.



Figura N°28: Instrumentos empleados en la caracterización del jugo de caña clarificado. Fuente: Elaboración propia.

IV.5. Análisis estadísticos

Mediante la técnica de análisis de varianza (ANOVA) se determinó si existían diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de cal empleado en la clarificación de jugo de caña (cal comercial o cal de cáscaras de huevos) y las concentraciones de lechada de cal utilizadas. Adicionalmente, se aplicó la prueba post hoc de Tukey para comparar las medias obtenidas sobre las diferentes propiedades (pH, turbidez y %Brix) en función a las variables independientes (tipo de cal y concentración de lechada de cal).

IV.6. Consideraciones éticas

La investigación se realizó respetando los protocolos establecidos para el uso de los equipos e instrumentos requeridos, así como también, se evitó en todo momento la alteración de los métodos de obtención de los resultados con la finalidad de preservar la confiabilidad.

También se cumplió con la veracidad de los datos, eludiendo la adulteración de estos, ya que provocaría fraude científico.

De igual manera, el propósito de la investigación fue de obtener resultados confiables con relevancia en la creación de nuevo conocimiento.

IV.7. Impacto Potencial de los Resultados de la Investigación

- Disminuir el impacto ambiental de la cáscara de huevo como residuo orgánico (reducción de residuos).
- Disminuir la explotación de recursos naturales y el impacto ambiental de su posterior procesamiento (alternativa ecológica).
- Reducir costos de aditivos y mantenimiento en la industria azucarera.
- Aumentar la calidad del jugo clarificado

V. RESULTADOS

Influencia del pH

El jugo de caña de azúcar naturalmente se encuentra a un pH entre (4,5 – 5,5). Luego, durante la clarificación, el jugo de caña aumenta su pH por la adición de cal hidratada para eliminar las impurezas mediante floculación y sedimentación (Larrahondo, 1995).

El pH en la clarificación de jugos de caña de azúcar es un parámetro muy importante en el rendimiento de este proceso. La literatura científica indica que puede afectar de manera importante a otros parámetros como la turbidez y el color. Según Sewwandi, M., et al., (2021), a pH muy ácidos, menores a 4, se produce la inversión de la sacarosa en glucosa y fructosa, lo que disminuye el proceso de nucleación y crecimiento de los cristales de azúcar y consecuentemente la eficiencia del proceso. Por otro lado, el incremento de pH disminuye exponencialmente la turbidez, sin embargo, la curva se ve más acentuada a pH mayores a 8,0. Según Larrahondo (1995), en condiciones demasiado alcalinas, por encima de 8,5, ocurre la degradación de la sacarosa y la formación de compuestos coloreados llamados melanoidinas (polímeros de alto peso molecular), lo que le confiere un color marrón al jugo de caña clarificado. También, Sewwandi, M., et al., (2021) y Abdel, H., et al., (2018), indican que la presencia de los flavonoides (apigenina, luteolina) y compuestos fenólicos (ácido ferúlico, ácido cafeico y ácido clorogénico) que están presentes en el jugo de caña, sufren la ionización de los grupos hidroxilo presentes en su estructura a elevado pH. Influyendo en su disposición para reflejar o absorber la luz, afectando el color del jugo clarificado.

En consecuencia, el pH del jugo de azúcar resultante debe encontrase en un rango de (7,0 – 8,0) para evitar la formación de sustancias coloreadas y que se mantenga el porcentaje de sacarosa presente (Sewwandi, Ariyawansha, Kumara, & Maralanda, 2021).

Influencia de la temperatura

Existe una gran afinidad entre el calcio proveniente de la cal y los fosfatos presentes en el jugo de caña (debido a los fertilizantes). Dependiendo de la concentración de calcio y fosfato disponible, se da la formación de compuestos como: fosfato dicálcico, fosfato monocálcico, fosfato tricálcico, fosfato octocálcico e hidroxiapatita (Sewwandi, Ariyawansha, Kumara, & Maralanda, 2021).

La temperatura para la adición de lechada de cal en la clarificación de jugo de caña influye en la eficiencia de la formación de los flóculos (Doherty, Greenwood, Pilaski, & Wright, 2002). A temperaturas bajas (35℃-40℃), las distintas formas de fosfato de calcio (flóculos primarios o microflocos) interactúan con las impurezas del jugo de caña (coloides), formando pequeños flóculos. En contraste, las temperaturas intermedias (72℃-76℃) y elevadas (90℃-100℃) permiten la coagulación de los coloides antes de interactuar con las formas de fosfato de calcio, generándose flóculos de mayor tamaño contribuyendo a la disminución de la carga final de las impurezas presentes en el jugo, lo cual favorece a la disminución de posibles incrustaciones en las operaciones unitarias siguientes (Eggleston, Monge, & Ogier, 2003).

En la industria azucarera usualmente se trabaja en condiciones calientes, empleando temperaturas cercanas al punto de ebullición, entre 105℃ - 110℃ (Gutierréz, León, Álvarez, & Genta, s.f). Sin embargo, algunas fábricas optan por temperaturas intermedias (75°C) para que se lleve a cabo la descomposición de una parte considerable del almidón presente en el jugo por acción de la enzima amilasa (Rein, 2012), el contenido restante de almidón es removido por arrastre mecánico y no por interacción iónica con los flóculos primarios debido a su carácter apolar (Seminario, 2024).

Por lo tanto, las temperaturas indicadas para la clarificación de jugo de caña deben estar entre un nivel intermedio-alto. Un rango óptimo se puede situar entre 72℃ y 100℃ (Doherty, Greenwood, Pilaski, & Wright, 2002).

Obtención de cal hidratada de cáscaras de huevo

La calcinación de las cáscaras de huevo se realizó en 3 crisoles, donde las pérdidas por ignición tienen un promedio de 46,70%, obteniéndose una masa de 26,6802 g de muestra calcinada (CaO), como se muestra en la Tabla N°11.

Tabla N°11: Resultados de la calcinación de las cáscaras de huevo

	Peso de Crisol (g)	**Peso de muestra (g)**	**Peso de muestra calcinada (g)**	**%L.O. I**
Crisol 1	44,9085	20,0100	10,6898	46,58
Crisol 2	44,6002	20,0001	10,6789	46,61
Crisol 3	35,8558	10,0048	5,3115	46,91

Fuente: Elaboración propia.

A partir de (26,5933) g del CaO de la calcinación de cáscaras de huevo, se obtuvieron 34,6481 g de cal hidratada. Considerando que estequiométricamente se obtendría 35,1411 g de cal hidratada (teórico), se obtuvo una eficiencia del 98,6% en la hidratación.

Clarificación de jugo de caña de azúcar

El pH del jugo de caña de azúcar oscilo en un rango de 4,77 – 5,58. Fue ajustado a 5,0 +/- 0,08 con la finalidad de cuantificar la eficiencia de la adición de lechada de cal a distintas concentraciones de cal comercial y de la cal de cáscaras de huevo.

Los valores de pH de jugo clarificado estuvieron entre 8,85 a 10,88, demostrando el alto contenido de cal en las lechadas. Sin embargo, se evidencia una disminución en la turbidez (menores a 50 NTU – Unidades Nefelométricas de Turbidez). El % Brix no tiene mucha

variabilidad a niveles de pH alcalinos, como se muestra los resultados presentados en la Tabla N°12.

Tabla N°12: Resultados de la clarificación de jugos de caña de azúcar.

Experimento	Tipo de Cal	Concentración (%m/v)	pH inicial	pH ajustado	pH final	% Brix	Turbidez
1	Cal comercial (muestra 1)	2,5%	5,56	4,96	9,15	14,4	32,7
2	Cal comercial (muestra 2)	2,5%	5,42	5,03	9,59	14,7	47,5
3	Cal comercial (muestra 3)	2,5%	5,53	4,96	9,01	14,4	32,1
4	Cal comercial (muestra 1)	5,0%	5,52	5,03	10,76	15,0	37,0
5	Cal comercial (muestra 2)	5,0%	5,27	4,92	10,80	15,2	35,9
6	Cal comercial (muestra 3)	5,0%	5,30	4,92	10,76	14,2	34,2
7	Cal comercial (muestra 1)	7,50%	5,38	5,02	10,88	14,5	20,3
8	Cal comercial (muestra 2)	7,50%	5,47	4,99	10,83	14,9	28,4
9	Cal comercial (muestra 3)	7,50%	5,58	5,01	10,83	14,7	20,3
10	Cal de cáscaras de huevo (muestra 1)	2,5%	5,58	4,96	9,08	14,7	32,5
11	Cal de cáscaras de huevo (muestra 2)	2,5%	5,53	4,95	9,42	14,6	37,4
12	Cal de cáscaras de huevo (muestra 3)	2,5%	5,51	5,06	8,85	14,5	25,8
13	Cal de cáscaras de huevo (muestra 1)	5,0%	5,44	5,05	10,43	14,2	29,7
14	Cal de cáscaras de huevo (muestra 2)	5,0%	5,35	5,01	10,68	15,4	32,8
15	Cal de cáscaras de huevo (muestra 3)	5,0%	4,77	5,01	10,49	14,0	38,6
16	Cal de cáscaras de huevo (muestra 1)	7,50%	5,43	5,02	10,81	14,8	17,2
17	Cal de cáscaras de huevo (muestra 2)	7,50%	5,54	5,08	10,83	14,9	17,6
18	Cal de cáscaras de huevo (muestra 3)	7,50%	5,36	5,03	10,78	14,7	20,0

Fuente: Elaboración propia.

Color de jugo clarificado

El color de jugo de caña clarificado se intensifica con concentraciones de lechada de cal más altos. Los colores más claros se obtienen a concentraciones del 2,5%, sin embargo, los jugos más traslúcidos (con menos turbiedad) se obtienen a concentraciones del 7,5%, tal como se muestran en las Figuras N°29, N°30 y N°31.

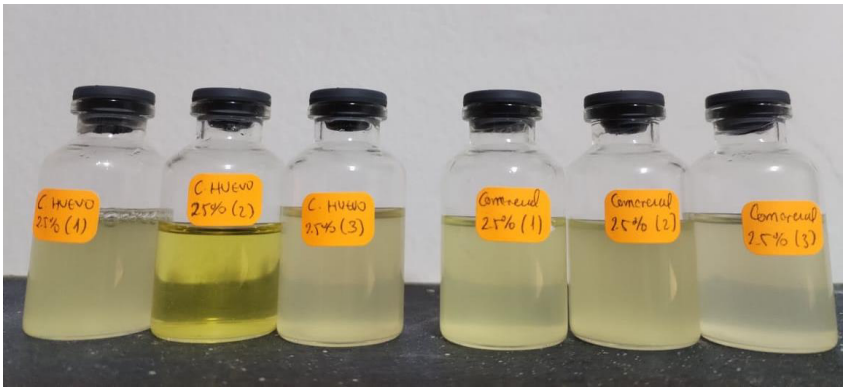


Figura N°29: Jugos clarificados con lechada de cal al 2,5%. Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de los tratamientos experimentales con lechada de cal al 2,5% que se muestra en la Figuras N°29, se observa que la muestra 2 clarificado con cal de cáscaras de huevo y cal comercial presentan un color más intenso a comparación de sus réplicas. Esto se debe, principalmente, a que tienen pH final (luego de la clarificación) más elevados, como se muestra en la Tabla N°13. A concentraciones bajas (2,5%), las muestras que tienen menor pH presentan menores niveles de turbidez.

Los valores de pH ligeramente mayores obtenidos con la cal comercial en comparación con de la cal de cáscaras de huevo proporcionan al jugo clarificado colores más intensos con lechada de cal en las concentraciones de 5% y 7,5%, como se muestra en la Figura N°30 y N°31, respectivamente.

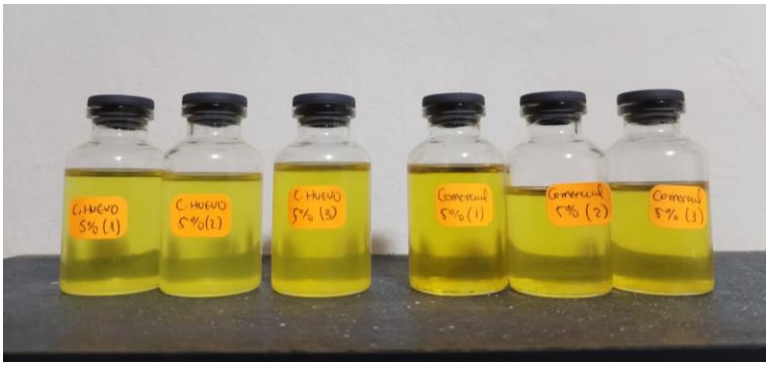


Figura N°30: Jugos clarificados con lechada de cal al 5%. Fuente: Elaboración propia.



Figura N°31: Jugos clarificados con lechada de cal al 7,5%. Fuente: Elaboración propia.

Análisis comparativo

La cal obtenida de las cáscaras de huevo presenta el mismo aspecto a nivel macro **(color, finura)** que la cal hidratada comercial.

La materia prima (roca caliza o cáscaras de huevo) define el grado de pureza que puede llegar a tener la cal. La cal comercial tiene una pureza controlada de forma industrial, partiendo de roca caliza con un contenido de carbonato de calcio factible para su procesamiento industrial. Por el contrario, las cáscaras de huevo presentan una pureza variable al ser un residuo orgánico

(presencia de proteínas y membranas), dependiendo de factores como la raza y alimentación de la gallina.

Por otra parte, el aprovechamiento de las cáscaras de huevo para la producción de cal tiene un impacto ambiental menor que el ocasionado por la roca caliza, ya que este residuo orgánico elimina la ecotoxicidad que ocasiona la extracción minera en su procesamiento.

Los niveles de clarificación obtenidos con la cal de cáscaras de huevo (pH final, % Brix y Turbidez) son similares a los obtenidos con la cal comercial, como se muestra en la Tabla N°13.

Tabla N°14: Cuadro comparativo de características de la cal comercial y cal de cáscaras de huevo

Característica	Cal comercial	Cal de cáscaras de huevo
Origen	Roca caliza	Cáscaras de huevo
Aspecto	Polvo blanco fino	Polvo blanco fino
Impacto ambiental	Alto	Menor
Pureza	Controlada de forma industrial	Variable
pH ajustado	4,98	5,02
pH final	10,3	10,2
% Brix	14,7	14,6
Turbidez (NTU)	32,0	28,0

Fuente: Elaboración propia.

Análisis estadístico: ANOVA

Se realizó el análisis de varianza para los parámetros, el pH final del jugo clarificado, el % Brix y la turbidez, como se presenta en las Figuras N°32, N°33 y N°34, respectivamente.

Como se evidencia en la Figura N°32, el análisis de varianza (ANOVA) para el pH final muestra que la influencia del tipo de cal no es significativa estadísticamente, ya que el valor p

(valor de probabilidad) > 0,05, por lo que la cal comercial y la cal de cáscaras de huevo tienen el nivel de alcalinidad similares. En contraste, el pH final del jugo clarificado depende principalmente de la concentración de lechada de cal utilizada (valor p < 0,05), lo que supone que las medias de pH final a los distintos niveles de concentración evaluados son significativamente diferentes. Esto último se fundamenta en que, a mayores concentraciones de lechada de cal, existe una mayor masa de hidróxido de calcio.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de Cal	1	0.0854	0.08542	2.66	0.129
Concentración (%m/v)	2	9.7830	4.89149	152.17	0.000
Tipo de Cal*Concentración (%m/v)	2	0.0300	0.01502	0.47	0.638
Error	12	0.3857	0.03214		
Total	17	10.2842			

Figura N°32: Análisis ANOVA para pH final vs Tipo de cal y concentración de lechada de cal. El análisis ANOVA se realizó en el software MINITAB. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura N°33, el % Brix no tiene variación significativa con el tipo de cal (valor p > 0,05), por lo que la cal comercial y la cal de cáscaras de huevo tienen un impacto similar en el contenido de sólidos solubles totales (principalmente sacarosa). Además, la concentración de lechada de cal tampoco presenta una influencia importante en el % Brix (valor p > 0,05). A las concentraciones evaluadas (2,5%, 5% y 7,5%), se obtiene un rango de pH de 8,85 a 10,88, las cuales son condiciones que conllevan a la degradación de la sacarosa (pH > 8,5), disminuyendo el % Brix a valores similares a condiciones alcalinas.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de Cal	1	0.00222	0.002222	0.01	0.907
Concentración (%m/v)	2	0.12111	0.060556	0.39	0.688
Tipo de Cal*Concentración (%m/v)	2	0.13444	0.067222	0.43	0.662
Error	12	1.88667	0.157222		
Total	17	2.14444			

Figura N°33: Análisis ANOVA para % Brix vs Tipo de cal y concentración de lechada de cal. El análisis ANOVA se realizó en el software MINITAB. Fuente: Elaboración propia.

La Turbidez sola es influenciada por la concentración de la lechada de cal (valor de $p < 0,05$), pero no por el tipo de cal utilizado (valor $p > 0,05$), como se muestra en la Figura N°34. Debido a que la cal comercial y cáscaras de huevo presentan similares valores de turbidez, se evidencia la alta reactividad que tiene la cal de cáscaras de huevo al interactuar con las impurezas (coloides) para formar flóculos.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de Cal	1	75.24	75.236	2.88	0.115
Concentración (%m/v)	2	789.61	394.807	15.13	0.001
Tipo de Cal*Concentración (%m/v)	2	10.30	5.149	0.20	0.824
Error	12	313.13	26.094		
Total	17	1188.28			

Figura N°34: Análisis ANOVA para Turbidez vs Tipo de cal y concentración de lechada cal. El análisis ANOVA se realizó en el software MINITAB. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura N°35 (grafica de efectos principales para Turbidez). Se obtiene que la cal de cáscaras de huevo tiene una media ligeramente inferior a la de la cal comercial en la remoción turbidez obtenida en la clarificación de jugo de caña, con valores de 27,96 NTU y 32,04 NTU

respectivamente. Esta ligera diferencia es ocasionada por los bajos valores de turbidez obtenidos a 7,5% de concentración con ambos tipos de cal (cal comercial y cal de cáscaras de huevo), como se muestra en la Figura N°35 (grafica de interacción para Turbidez),

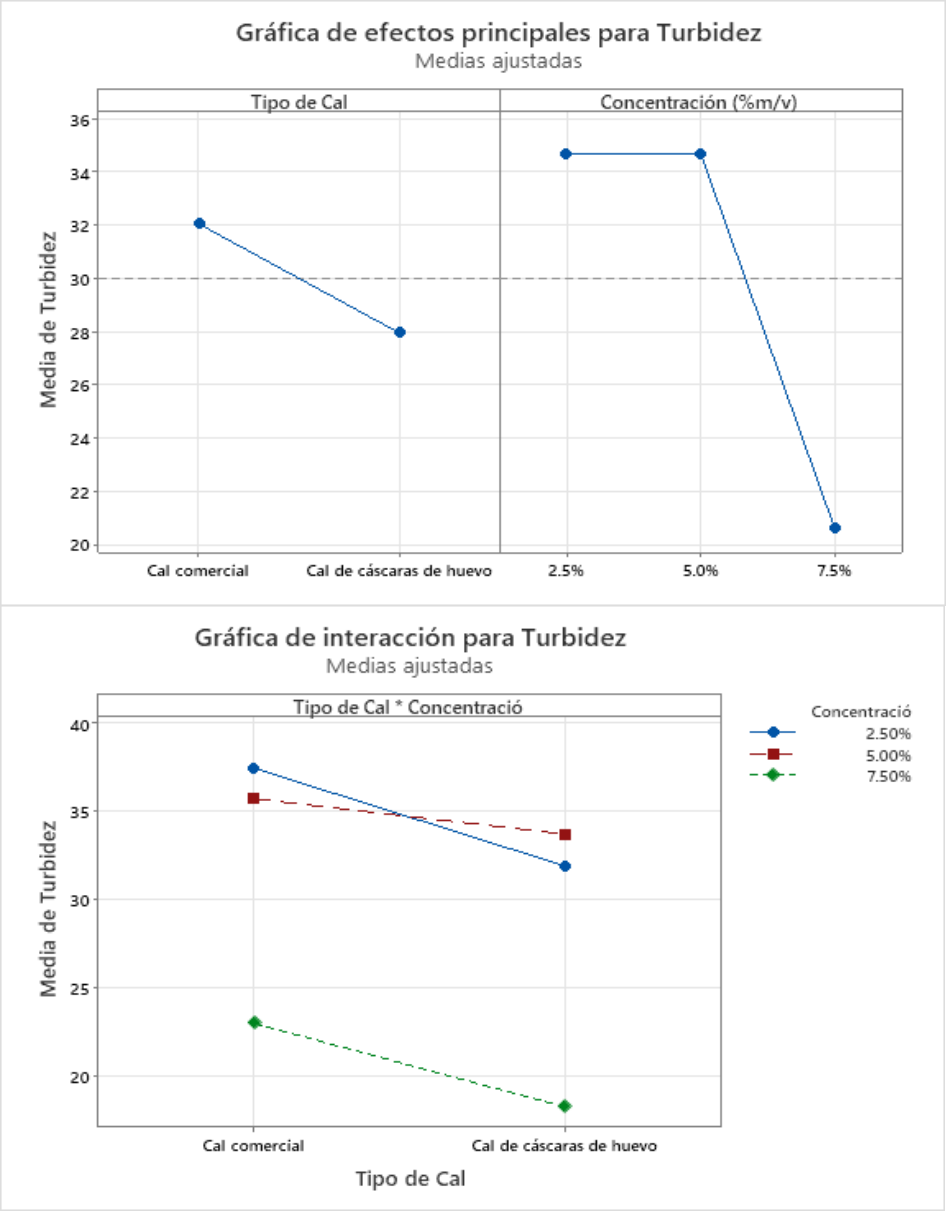


Figura N°35: Gráfica de efectos principales y gráfica de interacción del tipo de cal y la concentración (%m/v) sobre la turbidez. Las gráficas se realizaron en el software MINITAB. Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos del análisis estadístico, se puede establecer una relación directa entre el % Brix y la concentración de lechada de cal, como se muestra en la Figura N°36 (grafica de efectos principales para %Brix). Se obtuvieron concentraciones ligeramente mayores con la cal comercial, sin embargo, estas variaciones no son significativas, ya que varían en un rango corto (14,64% - 14,67%). Cabe recalcar que a concentraciones de lechada de cal al 5% ocurrió un comportamiento contrario a comparación de concentraciones de 2,5% y 7,5%, como se muestra en la Figura N°36 (grafica de interacción para %Brix).

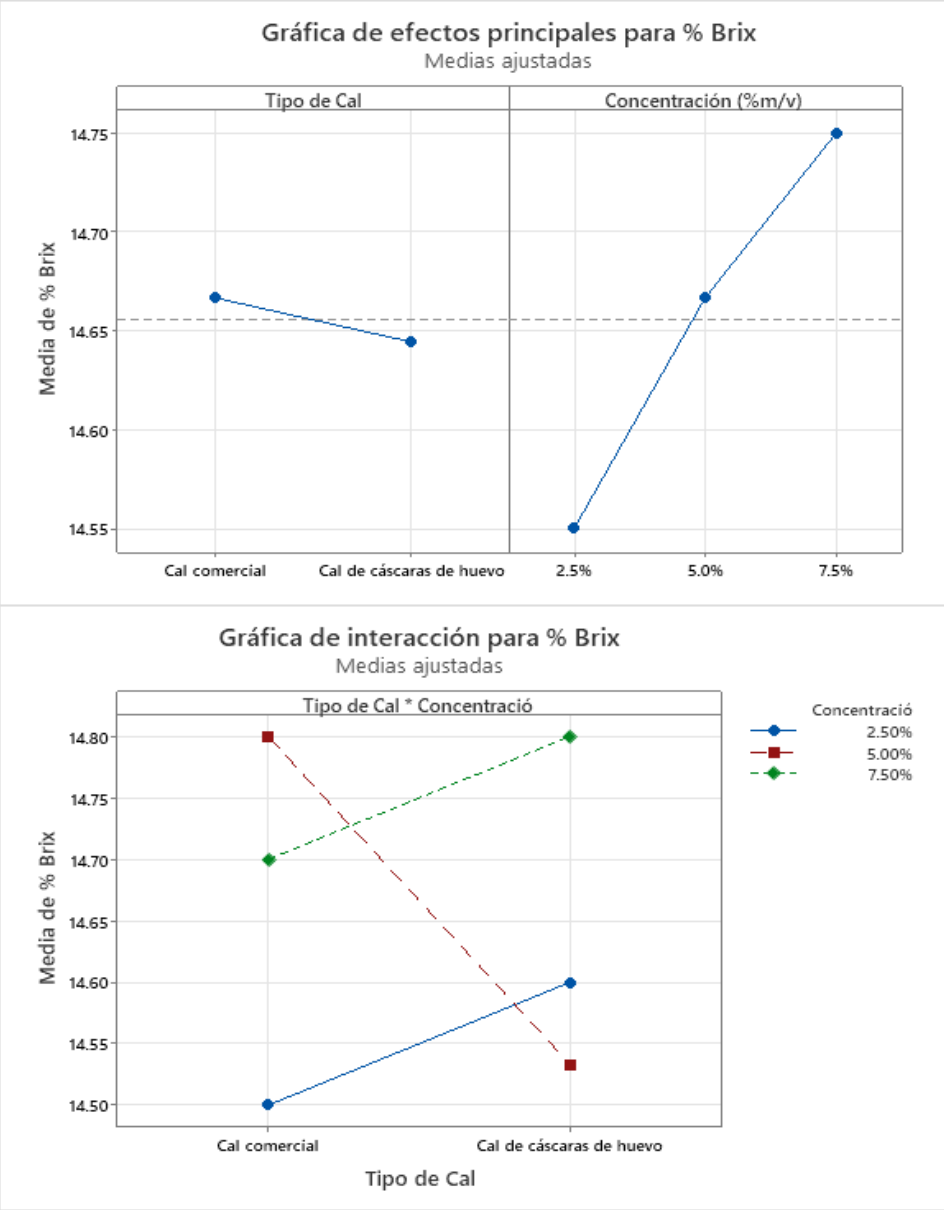


Figura N°36: Gráfica de efectos principales y gráfica de interacción del tipo de cal y la concentración (%m/v) sobre %Brix. Las gráficas se realizaron en el software MINITAB. Fuente: Elaboración propia.

Se observó también que la cal comercial alcanza niveles ligeramente mayores de alcalinidad que la cal de cáscaras de huevo, de pH 10,29 a 10,15 respectivamente. Los niveles de

pH se ven incrementados significativamente con concentraciones de lechada de cal al 5%, sin embargo, la pendiente de crecimiento se ve reducida a concentraciones mayores, como se muestra en la Figura N°37 (Gráfica de efectos principales), lo cual se produce debido a que la curva de pH se acentúa a altos niveles de alcalinidad (exceso de base),

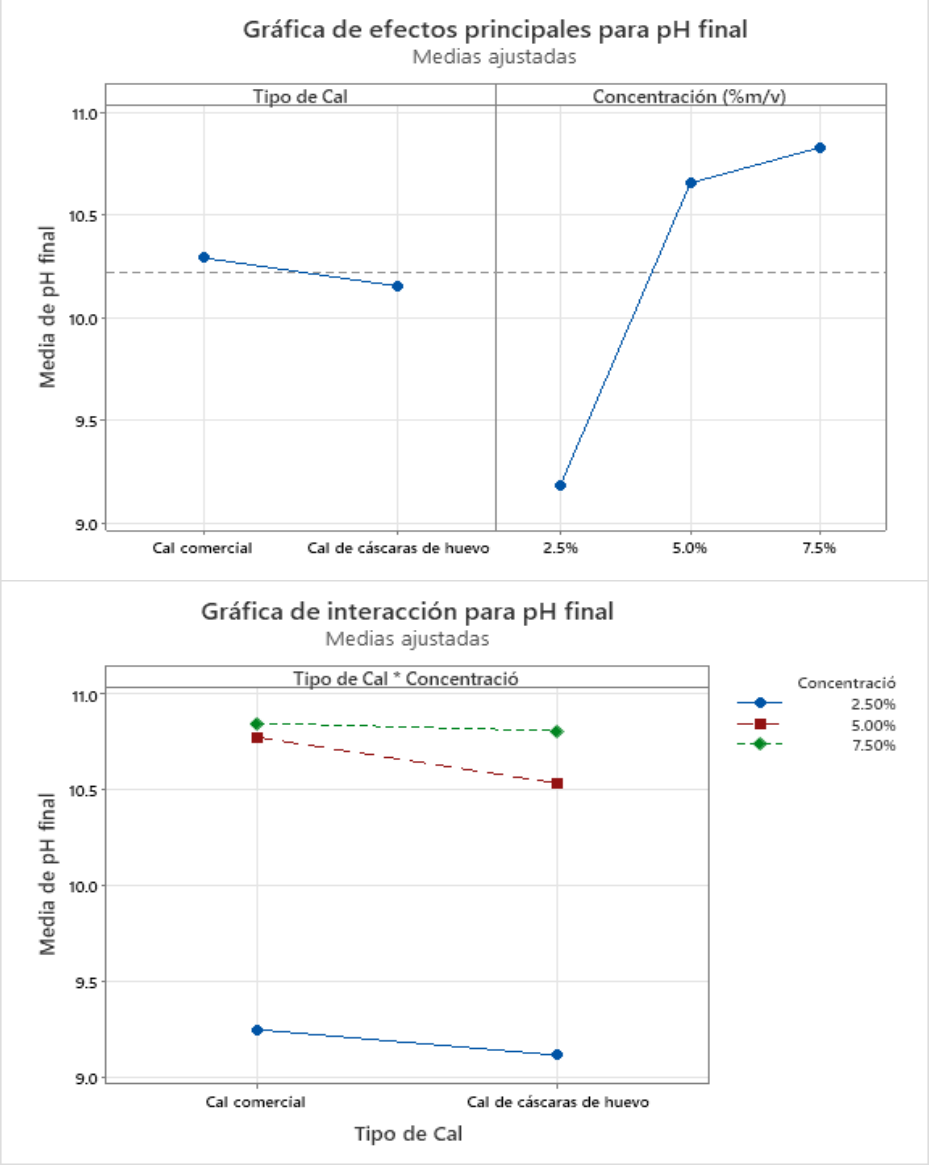


Figura N°37: Gráfica de efectos principales y gráfica de interacción del tipo de cal y la concentración (%m/v) sobre el pH final. Las gráficas se realizaron en el software MINITAB. Fuente: Elaboración propia.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los hallazgos de esta investigación permitirán definir la eficacia de la cal obtenida de las cáscaras de huevo en la clarificación de jugos de caña, en comparación con la cal hidratada comercial. En términos generales, ambos productos evidenciaron su habilidad para incrementar el pH del jugo de caña, alta reactividad para formar flóculos y sedimentar impurezas. No obstante, se detectaron diferencias importantes en ciertos parámetros esenciales.

La cal comercial fue simulada con hidróxido de calcio al 99%, considerando un 85% de pureza de Ca $(OH)_2$ para el producto comercial. A pesar de ello, el hidróxido de calcio de grado reactivo obtuvo niveles similares a la cal hidratada de cáscaras de huevo. No se realizó un análisis granulométrico directo, sin embargo, de la literatura se infiere que esta diferencia radica principalmente en que el hidróxido de calcio al 99% presenta un tamaño de partícula entre 0,5μm-20 μm (Komabayashi, D'souza, Dechow, Safavi, & Spångberg, 2009), el cual es mucho menor al mostrado por la cal hidratada de cáscaras de huevo, 35% retenida malla N°.200 (75 μm) (Saldanha, Da Rocha, & Caicedo, 2021). Esto influye directamente en el área de superficie especifica, donde el hidróxido de calcio grado reactivo tiene valores más elevado entre 11,3 m^2/g-18 m^2/g (Cardoso, Fernandes, Pileggi, Cincotto, & Vanderley, 2009), en comparación con el valor de 4,80 m^2/g que se obtiene de la cal hidratada de cáscaras de huevo (Saldanha, Da Rocha, & Caicedo, 2021). Por lo que, la cal comercial utilizada presenta mayor área disponible para reacciones químicas, y por consiguiente mayor reactividad.

El análisis estadístico no encontró diferencias significativas entre los resultados de la clarificación de jugos de caña en función del tipo de cal a utilizar con respecto al pH final del jugo clarificado, el % Brix y la turbidez. Sin embargo, se puede observar que a concentraciones de 2,5% y 5% se logran valores de turbidez similares, de 34,67 NTU y 34,7 NTU (como se indica en Figura

N°35) con los colores de jugo muy diferentes (Figura N°29 y N°30). El jugo clarificado con lechada de cal al 2,5% presenta colores más claros en comparación del jugo clarificado con lechada de cal al 5%, el cual presenta un color amarillo verdoso. El incremento de la concentración de 2,5% al 5% supone un incremento del pH final del jugo clarificado de 9,18 a 10,65 respectivamente (Figura N°38). El aumento de pH contribuye a la ionización de los grupos hidroxilo presentes en la estructura de los flavonoides (apigenina, luteolina) y compuestos fenólicos (ácido ferúlico, ácido cafeico y ácido clorogénico) que están presentes en el jugo de caña, influyendo en su capacidad de interactuar con la luz y afectando el color del jugo clarificado (Abdel, Elrafie, Yasir, & Eltyb, 2018). La presencia de estas impurezas que afectan el color puede variar dependiendo la capacidad de adsorción que tienen la cal comercial y cal de cáscaras de huevo en función al área de superficie especifica. Para los tratamientos con lechada de cal al 7,5%, se obtiene un incremento de pH mayor, llegado a un valor de 10,83 e intensificando el color con un tono más oscuro (Figura N°39). En condiciones demasiado alcalinas se da a lugar a la degradación de la sacarosa y la formación de compuestos coloreados llamados melanoidinas (polímeros de alto peso molecular), lo que le confiere un color marrón oscuro al jugo de caña clarificado (Larrahondo, 1995).

Los bajos valores de Turbidez obtenidos para las distintas concentraciones de lechada de cal fueron de 34,.67 NTU (2,5%), 34,7 NTU (5%) y 20,63 NTU (7,5%) (Figura N°35), en condiciones de pH de 8,85 a 10,88. El incremento de pH disminuye la turbidez exponencialmente. Sin embargo, a pH elevado, por encima de 8,0 la curva de turbidez vs pH se va acentuando y se obtienen valores más similares (Sewwandi, Ariyawansha, Kumara, & Maralanda, 2021).

Los valores de %Brix obtenidos para las distintas concentraciones de lechada de cal fueron de 14,55% (2,5%), 14,67% (5%) y 14,75 (7,5%) (Figura N°36). En las tres condiciones se obtuvieron %Brix bajos debido a los elevados pH final del jugo clarificado obtenidos, los cuales

promovieron la degradación de sacarosa en glucosa y fructosa, disminuyendo la cantidad de sólidos solubles (%Brix). Las pequeñas variaciones de % Brix se deben, principalmente, a la misma naturaleza del jugo de caña (contenido de sacarosa), al grado de degradación que sufre la sacarosa en condiciones alcalinas (Larrahondo, 1995) y a la precisión del refractómetro digital HI 96801 ($\pm$ 0.2%). Los tratamientos con lechada de cal al 5% tuvieron un comportamiento contrario al que presentan las concentraciones de 2,5% y 7,5% (como se muestra en la Figura N°36), en este caso, la cal comercial obtuvo mayor %Brix a comparación de la cal de cáscaras de huevo, debido a que en el tratamiento 15, que se muestra en la Tabla N°15, el jugo de caña presenta un pH inicial de 4,77 (ácido), cuya naturaleza (contenido de sacarosa y presencia de impurezas) influye en el valor de turbidez luego de la clarificación, obteniendo 38,6 NTU, el cual fue el más alto de todos los tratamientos realizados con lechada de cal al 5% (Cabrera, Herrera, & Gómez, 2020). Los valores más altos de turbidez dificultan la medición con refractómetros ópticos pudiendo llevar a lecturas inexactas (Considine & Frankish, 2023). La sobresaturación iónica de impurezas como los flavonoides y compuestos fenólicos a altos niveles de pH (sobredosificación de cal) también pueden llegar a interferir en la lectura refractométrica del %Brix (Jaywant, Singh, & Arif, 2022)

Finalmente, es importante mencionar que la variación en el contenido de $CaCO_3$ de las cáscaras de huevo y la necesidad de un tratamiento primario (limpieza y desinfección) para su procesamiento en la obtención de cal hidratada, son aspectos que deben tener en cuenta para la escalabilidad a nivel industrial de este producto. Sin embargo, los resultados logrados en la presente investigación corroboran la capacidad de la cal de cáscaras de huevo como opción viable a la cal comercial en la industria azucarera, ya que no se encontraron diferencias significativas en su impacto en el proceso de clarificación de jugos de caña. Adicionalmente, la cal de cáscaras de

huevo resalta al favorecer la sostenibilidad del medio ambiente a partir de la disminución de la ecotoxicidad frente a la cal comercial.

VII. CONCLUSIONES

- La calcinación de cáscaras de huevo a 1000℃ permite la obtención de cal de alta calidad comparable a la cal comercial.
- La cal obtenida de las cáscaras de huevo no presenta diferencias significativas con la cal comercial en la clarificación de jugos de caña de azúcar, cuando se compara los parámetros: Turbidez, pH y % Brix.
- A niveles de pH alcalinos se obtuvo reducciones óptimas de turbidez con niveles de color bastante altos.
- El hidróxido de calcio al 99% presenta mayor reactividad gracias a su menor tamaño de partícula, lo que incrementa su eficiencia en el proceso de clarificación.

VIII. RECOMENDACIONES

- Para obtener mejores resultados con la cal obtenida con las cáscaras de huevo se recomienda utilizar métodos de molienda que permitan reducir más el tamaño de partícula de forma más homogénea.
- Realizar un estudio granulométrico de las cáscaras de huevo para calcular el P_{80} de las partículas y analizar su influencia en la clarificación de jugos de caña de azúcar.
- Realizar estudios en gran escala de producción de cal de cáscaras de huevo para determinar la factibilidad.
- Promover el uso de cal de cáscaras de huevo en las localidades cercanas y en diversas aplicaciones como, por ejemplo, material de construcción, corrección de suelos ácidos, tratamiento de aguas, neutralización, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel, H. M., Elrafie, A. A., Yasir, A. M., & Eltyb, A. (2018). THE EFFECT OF CONCENTRATION OF LIME IN CLARIFICATION OF CANE SUGAR JUICE. *In European Scientific Conference*, 48-53.

Aguilar, C., & Ramírez, A. (2021). OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CAL MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA HIDRATADORA Y LA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS LEAN MANUFACTURING EN LA EMPRESA INCOREG UBICADA EN EL CANTÓN RIOBAMBA. *Trabajo de titulación.* ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Riobamba, Ecuador.

APAH. (s.f). *Proceso de elaboración de azúcar*. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de Asociación de Productores de Azúcar de Honduras: https://productoresdeazucarhonduras.com/proceso-de-produccion/

Beck, K., Brunetaud, X., Mertz, J. D., & Al-Mukhtar, M. (2010). On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes. *Geological Society*, 137-145.

Birhanua, T., Makur, M., & Duraisamy, R. (2024). Evaluation of Okra (Abelmoschus esculentus) Powder and Nano CaO as Alternative Clarifiers for Lime in the Processing of Sugarcane Juice. *Sugar Tech 26*, 446-468. doi:https://doi.org/10.1007/s12355-024-01363-7

Cabrera, P., Herrera, S., & Gómez, A. (2020). NFLUENCIA DEL USO DEL CARBONATO DE CALCIO (CACO3) EN LA ALCALINIZACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DEL JUGO DE CAÑA. *Centro Azúcar*, 70-82.

CALCESUR. (05 de Julio de 2025). *INTICAL.* Obtenido de INTICAL: https://intical.com.pe/cal-hidratada/

Cardoso, F., Fernandes, H., Pileggi, R., Cincotto, M., & Vanderley, J. (2009). Carbide lime and industrial hydrated lime characterization. *Powder Technology*, Volume 195, Issue 2, 143-149. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.05.017

Carrasco, J. C. (14 de Marzo de 2024). *Agencia Agraria de Noticias*. Obtenido de Agencia Agraria de Noticias: https://agraria.pe/noticias/peru-produce-entre-1-millon-y-1-2-millones-de-toneladas-de-35065

CISA. (s.f). *Proceso de Obtención*. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de CISA: http://www.cisahn.com/proceso-de-obtencion.html

COAZUCAR. (s.f). *Elaboración del azúcar*. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de Corporación Azucarera del Perú.

Doherty, W. O., Greenwood, J., Pilaski, D., & Wright, P. G. (2002). The effect of liming conditions in juice clarification. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, Vol. 24, 443-451.

Eggleston, G., Monge, A., & Ogier, E. (2003). SUGARCANE FACTORY PERFORMANCE OF COLD, INTERMEDIATE, AND HOT LIME CLARIFICATION PROCESSES. *Journal of Food Processing and Preservation, 26*, 433-454. Obtenido de https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55396208

El sitio avicola. (02 de Agosto de 2013). *Enfermedades de la avicultura de traspatio*. Obtenido de https://www.elsitioavicola.com/articles/2421/enfermedades-de-la-avicultura-de-traspatio-parte-8-a-reproduccian-e-incubacian-de-huevo/

EULA. (2021). *LA CAL: SUMIDERO NATURAL DE CARBONO.* Bruselas, Bélgica: European Lime Association.

Flores, O. (27 de Abril de 2019). *Minería en línea*. Obtenido de Minería en línea: https://mineriaenlinea.com/glosario/rocas-sedimentarias/

Geoinnova. (16 de Mayo de 2016). Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente. Pamplona, Navarra, España. Obtenido de Geoinnova: https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/

Granito. (24 de Diciembre de 2021). *Granito de arena*. Obtenido de Granito de arena: https://www.revistagranitodearena.com/uso-eficiente-de-la-cal-para-la-produccion-de-azucar/

Gutierréz, D., León, R., Álvarez, N., & Genta, N. (s.f). CLARIFICACIÓN DE JUGO EN LA ELABORACIÓN DE AZÚCAR ORGÁNICA. *Universiadad Nacional de Tucumán*. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://fcai.uncuyo.edu.ar/upload/12atc-gutierrez-fce-unt.pdf

Hamerski, F., Dantas, A., & Matar, P. (2011). Clarificação do caldo de cana-de-açúcar por carbonatação - ensaios. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 33, n. 3, p. 337-341.

IIMP. (11 de Octubre de 2024). PERÚ CONSUME MÁS DE 30 MILLONES DE TONELADAS DE CALIZA AL AÑO. Lima, Lima, Perú. Obtenido de https://iimp.org.pe/institucional/noticias/peru-consume-mas-de-30-millones-de-toneladas-de-caliza-al-ano

IPAAT. (s.f). *Proceso de fabricación de azúcar*. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de Instituto de Promoción del Azúcar y Alcohol de Tucumán: https://www.ipaat.gov.ar/nota/279/proceso-de-fabricacion-de-azucar

Jiménez Delgado, M. C., & Guerrero, I. C. (2007). The performance of lime–cement mortars in the restoration of a historic building. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 760–770. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.002

Komabayashi, T., D'souza, R., Dechow, P., Safavi, K., & Spångberg, L. (2009). Particle Size and Shape of Calcium Hydroxide. *Journal of Endodontics*, Volume 35, Issue 2, 284-287. doi:https://doi.org/10.1016/j.joen.2008.11.017

Larrahondo, J. (1995). Calidad de la caña de azúcar. *CENICAÑA*, 337-354.

Mahdavi, S., Amirsadeghi, A., Jafari, A., Niknezhad, S., & Bencherif, S. (2021). Avian Egg: A Multifaceted Biomaterial for Tissue Engineering. *Ind Eng Chem Res*, 60(48): 17348–17364. doi:doi:10.1021/acs.iecr.1c03085

Matute, L., Bedoya, C., & Feo, J. (2012). Determinación de la concentración óptima de floculante a usar en la clarificación de jugos de caña en un central azucarero. *Agronomia UCV*, 115-122. Obtenido de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/5903/5697

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.* McGraw-Hill Education.

Meneguz, B., Nierwinski, H. P., & Caetani, B. C. (2024). Comparison Between Eggshell Lime and Commercial Lime as a Soil Stabilizing Agent. *In Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Vol. 18, p. 21.

Mostafa, F. A., Gad, A. N., Gaber, A. A., & Abdel-Wahab, A. M. (2023). Preparation, characterization and application of calcium oxide nanoparticles from waste carbonation mud in clarification of raw sugar melt. *Sugar Tech*, 331-338.

MTEySS. (2023). *Manual de Buenas Prácticas: Elaboración de cal.* Buenos Aires: Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social Argentina.

Nayarit. (21 de Agosto de 2018). *Gobierno de Mexico*. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de Gobierno de Mexico: https://www.gob.mx/agricultura/nayarit/articulos/la-cana-de-azucar-y-su-importancia-para-la-industria-azucarera?idiom=es

Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete.* Pearson: Pearson Education Limited.

Ogando, F. I., Xastre, T., Simões, E., & Aguiar, C. L. (2021). Removal of color and turbidity in sugarcane juice treated by electrocoagulation with aluminum electrodes. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 24, e2020236.

PROCASAC. (02 de Julio de 2025). *PROCASAC cal de calidad*. Obtenido de PROCASAC cal de calidad: https://procasac.com/productos/cal-hidratada/

Proceso de fabricación de azúcar. (s.f). *IPAAT*. Obtenido de IPAAT: https://www.ipaat.gov.ar/nota/279/proceso-de-fabricacion-de-azucar

Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar.* Berlín: Bartens.

Rodriguez, S. (21 de Noviembre de 2024). *CZ*. Obtenido de CZ: https://www.czapp.com/es/analyst-insights/seminario-latam-q424-que-le-espera-la-industria-del-azucar-para-el-resto-del-2024-y-que-podemos-esperar-para-el-2025/

Saldanha, R. B., Da Rocha, C. G., & Caicedo, A. M. (2021). Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 298, 123648.

Seminario, J. (8 de Abril de 2024). Oportunidades de mejora en la clarificación del Jugo de caña para la producción de azúcar. *Linkedin*. Obtenido de https://www.linkedin.com/pulse/oportunidades-de-mejora-en-el-tratamiento-jugo-ca%C3%B1a-seminario-abad-qaxse/

Sewwandi, M. N., Ariyawansha, S., Kumara, B. S., & Maralanda, A. (2021). Optimizing pre liming ph for efficient juice clarification process in Sri Lankan sugar factories. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 14-20.

Shafizadek, F., Furneaux, F., & Stevenson, J. (1979). Some reactions of levoglucogenone. *Carboh. Res*, 17:169.

SUNAT. (21 de Diciembre de 2020). *Listado de Insumos Químico y Bienes Fiscalizados (IQBF)*. Obtenido de https://www.gob.pe/institucion/sunat/informes-publicaciones/1430728-listado-de-insumos-quimico-y-bienes-fiscalizados-iqbf

Vázquez, C. (2020). *Obtención de carbonato de calcio a partir de materia orgánica.* JUÁREZ: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEXICOTEPEC DE JUÁREZ. Recuperado el 05 de Julio de 2025, de https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-tecnologica-de-xicotepec-de-juarez/quimica/obtencion-de-carbonato-de-calcio-a-partir-de-materia-organica/22574499

Vázquez, D., Henkel, J., Legorreta, F., Barrientos, F., & Urbano, G. (2021). Extracción de calcio en solución a partir de cáscara de huevo. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, Vol. 8, 42-46.

Venkatesh, T., George, A., Sajeev, M. S., & Kothakota, A. (2024). Plant-based hydrocolloids for efficient clarification of cane juices: rheological analysis and solidification studies. *Food & Function*, 15(4), 1977-1993. doi:https://doi.org/10.1590/1981-6723.23620

Villalba, R., & Rodríguez, D. (2019). Aplicaciones industriales de la cal en procesos químicos. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 45–58.

Wahab, M. (2018). Characterizations of El Minia limestone for manufacturing paper filler and coating. *Egyptian Journal of Petroleum*, 437-443. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.07.007.

Zemanate, C., & Zapata, F. (2015). ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE ROCAS CALCÁREAS TÍPICAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CALES EN EL

MUNICIPIO DE VIJES. *Trabajo de licenciatura en ingeniería.* UNIVERSIDAD DEL VALLE, Santiago de Cali.

- **CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES**

ACTIVIDADES /SEMANAS	ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Desarrollo de plan de tesis																
Revisión bibliográfica para objetivo 1																
Desarrollo experimental																
Análisis de resultados y pruebas estadísticas																
Redacción de informe final																

ANEXOS

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LA CAL COMERCIAL Y LA OBTENIDA DE LA CÁSCARA DE HUEVO PARA LA SER UTILIZADA EN LA CLARIFICACIÓN DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR

ANEXO 1: Matriz de consistencia

	PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS
GENERAL	¿Será posible realizar el análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida de cáscaras de huevos para ser utilizada en la clarificación del jugo de caña de azúcar con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH)?	Realizar un análisis comparativo entre la cal comercial y la obtenida a partir de cascará de huevo para optimizar la clarificación del jugo de caña de azúcar con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).	Aplicando un análisis comparativo con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH) entre la cal comercial y la obtenida de la cáscara de huevo se optimizará la clarificación del jugo de caña de azúcar.
ESPECÍFICO 1	¿Cuáles son los factores más importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que influyen en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos?	Determinar los factores importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que influyen en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos.	Existen factores importantes (Temperatura, pH inicial de jugo de caña, Concentración de cal) que promuevan una óptima clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos.
ESPECÍFICO 2	¿Cuáles son las eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH)?	Determinar las eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).	Se obtienen altas eficiencias en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).
ESPECÍFICO 3	¿Cuáles son las diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cascarás de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH)?	Identificar las diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).	Existen diferencias significativas en la clarificación de jugo de caña de azúcar utilizando cal comercial y la obtenida a partir de cáscaras de huevos con los parámetros (turbidez, color, ºBrix y pH).

ANEXO 2: Operacionalización de variables independientes

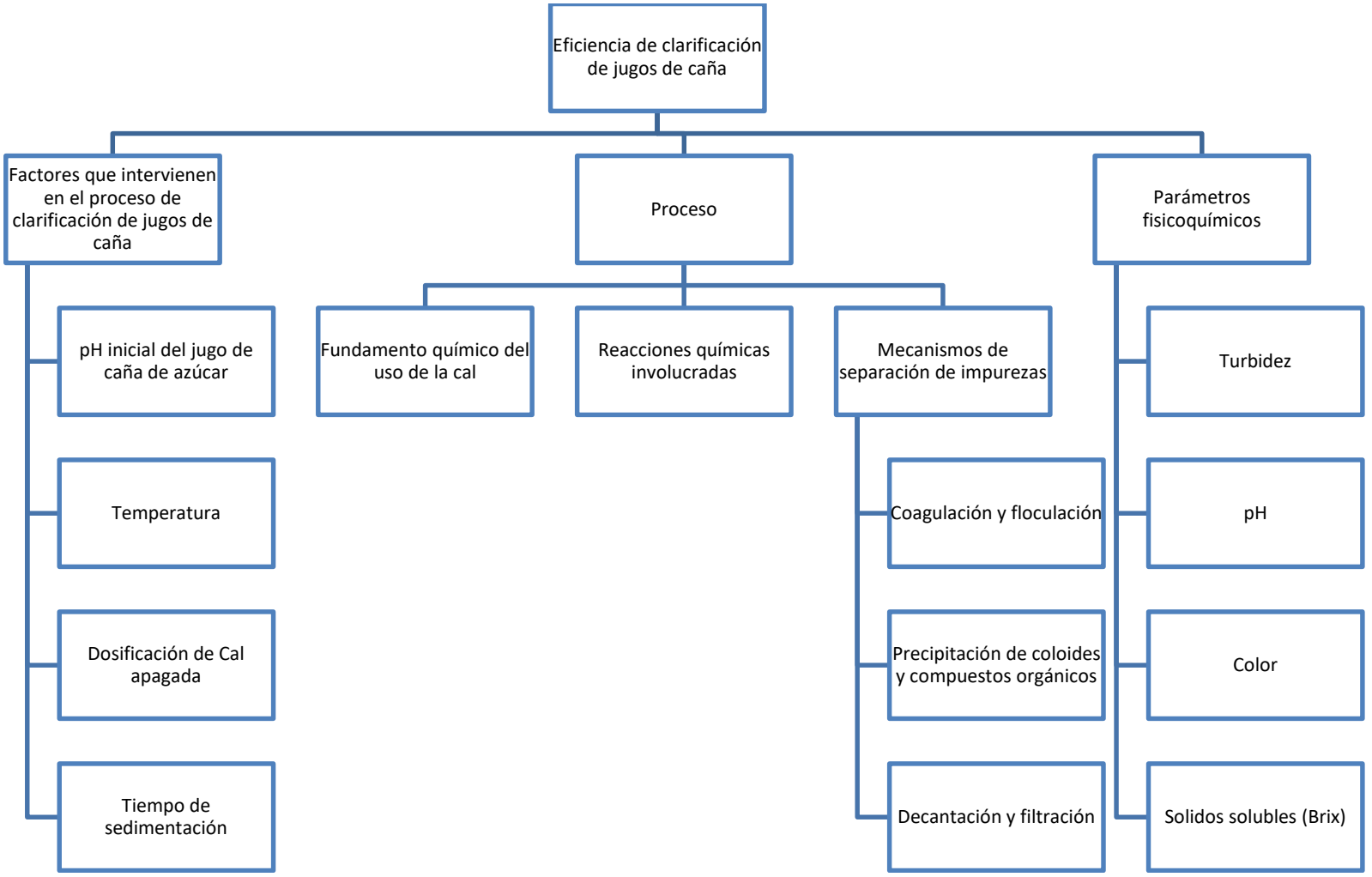
Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de medición
Cal de cáscara de huevo	Intensificador de la clarificación de jugo de caña proveniente de residuo orgánico.	Caracterización	Composición de la cal obtenida de la cáscara de huevo	Literatura cientifica
		Cantidad	Concentración de Cal	Balanza
Cal comercial	Intensificador de la clarificación de jugo de caña proveniente de la roca caliza.	Caracterización	Composición de la cal comercial	Literatura cientifica
		cantidad	Concentración de Cal	Balanza

ANEXO 3: Operacionalización de variable dependiente

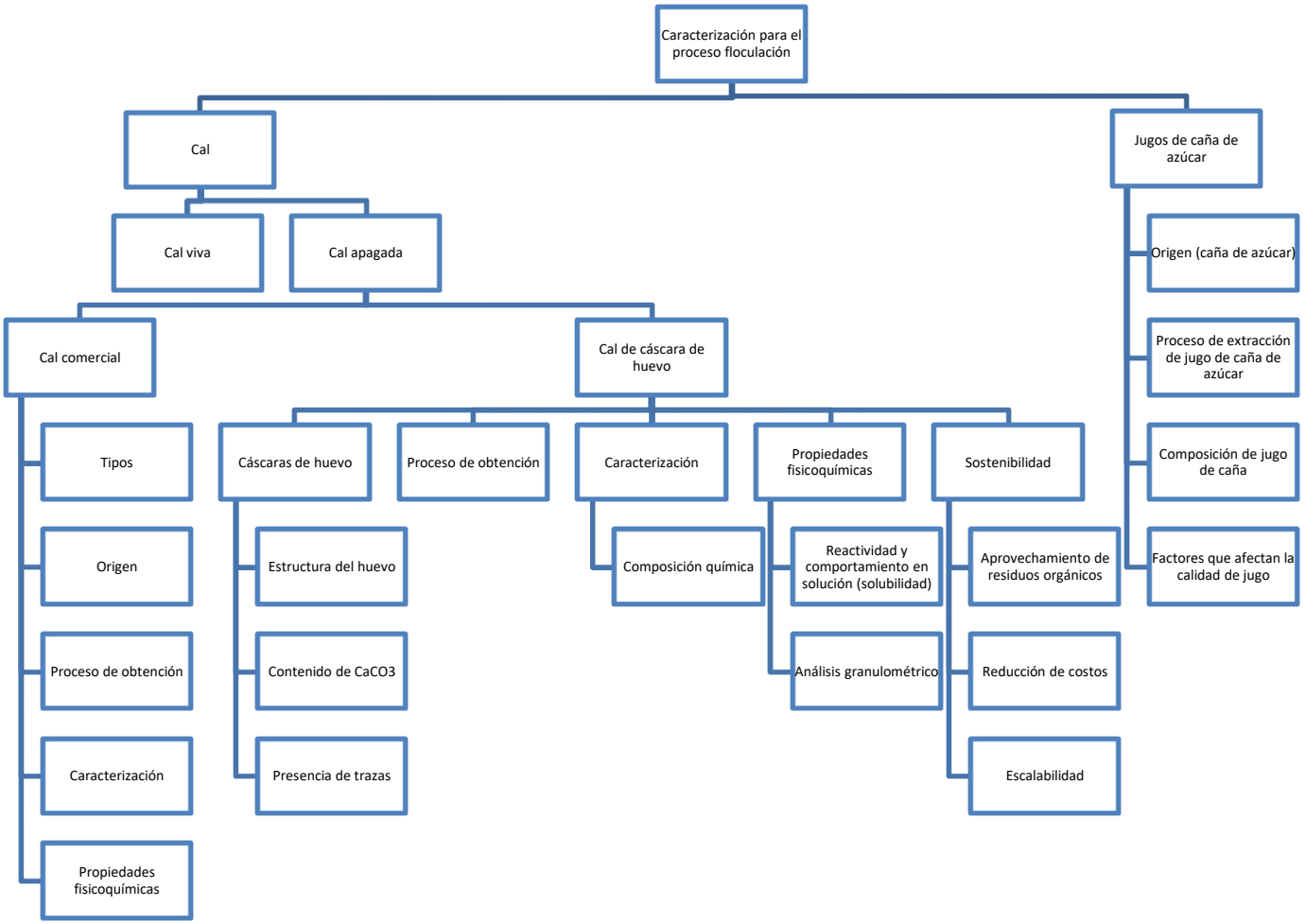
Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Instrumento de medición
Clarificación de jugo de caña de azúcar	Proceso de separaciñon de los no azúcares presentes en el jugo de caña	Caracterización Acidez/Alcalinidad	Turbidez	Turbidímetro
			Color	Sensorial
			ºBrix	Refractómetro
			pH	pHmetro

ANEXO 4: Mapas conceptuales por objetivos de la investigación

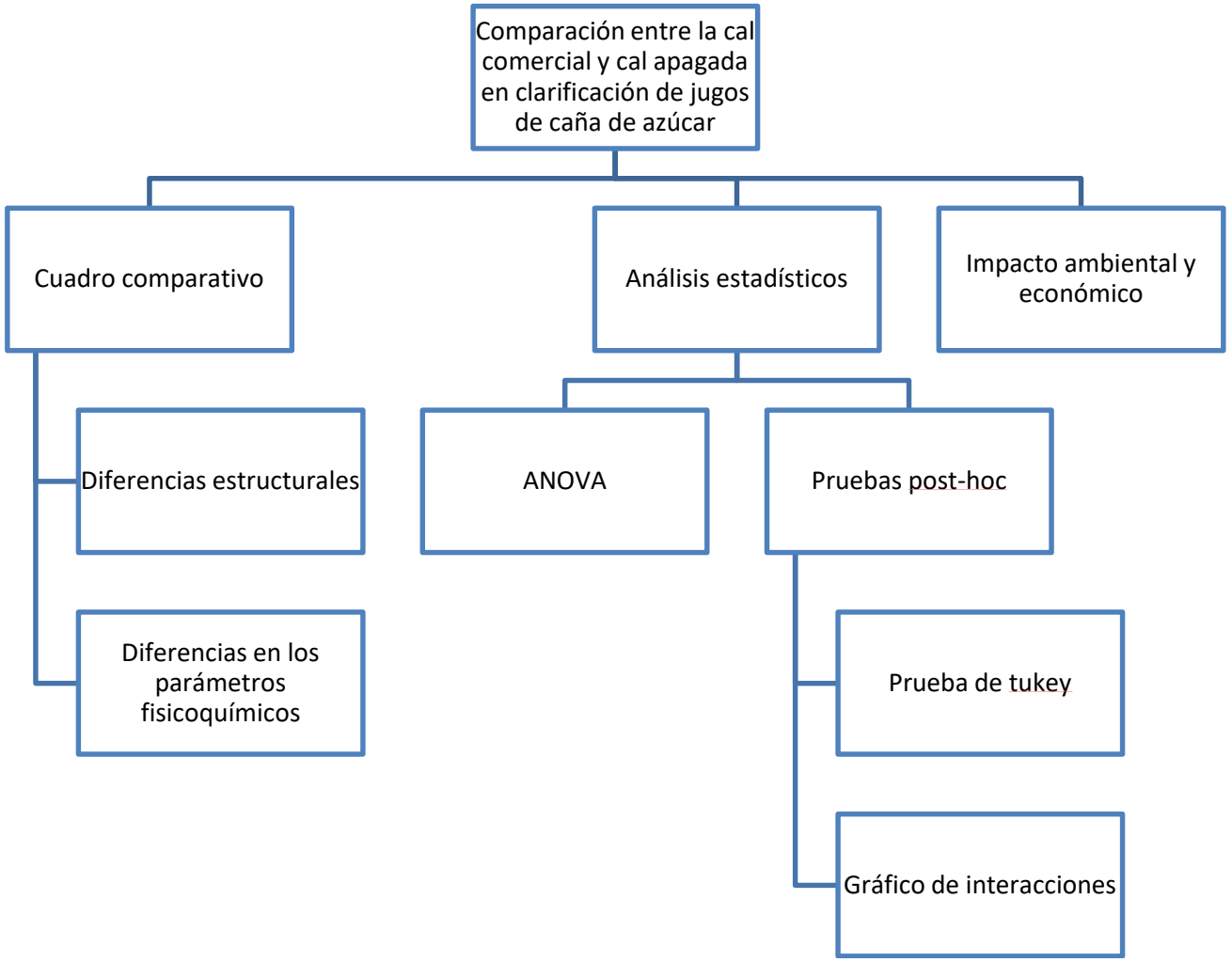
Objetivo 1



Objetivo 2


Caracterización para el proceso floculación
Cal
Cal viva
Cal apagada
Cal comercial
Tipos
Origen
Proceso de obtención
Caracterización
Propiedades fisicoquímicas
Cal de cáscara de huevo
Cáscaras de huevo
Estructura del huevo
Contenido de CaCO3
Presencia de trazas
Proceso de obtención
Caracterización
Composición química
Propiedades fisicoquímicas
Reactividad y comportamiento en solución (solubilidad)
Análisis granulométrico
Sostenibilidad
Aprovechamiento de residuos orgánicos
Reducción de costos
Escalabilidad
Jugos de caña de azúcar
Origen (caña de azúcar)
Proceso de extracción de jugo de caña de azúcar
Composición de jugo de caña
Factores que afectan la calidad de jugo

Objetivo 3


Comparación entre la cal comercial y cal apagada en clarificación de jugos de caña de azúcar
Cuadro comparativo
Análisis estadísticos
Impacto ambiental y económico
Diferencias estructurales
Diferencias en los parámetros fisicoquímicos
ANOVA
Pruebas post-hoc
Prueba de tukey
Gráfico de interacciones

ANEXO 5: Insumos químicos fiscalizados por la SUNAT

Decreto Supremo N° 268-2019-EF

ANEXO 1

N°	Insumo químico o producto	Fórmula química	Otras denominaciones
1	Acetato de Etilo	$C_4 H_8 O_2$	Ester Acético; Ester Etílico del Ácido Acético; Ester Etiloacético; Etanoato de Etilo; Acetidin; Vinagre de nafta.
2	Acetato de n-Propilo	$C_5 H_{10} O_2$	Etanoato de Propilo; n-Propil Éster del Ácido Acético; Acetato de Propilo.
3	Acetona	$C_3 H_6 O$	Acetonum; Dimetilcetona; Dimethylketone; Propanona; Espíritu Piroacético; 2-Propanona; ß-Cetopropana; Éter Piroacético; Ácido Piroacético.
4	Ácido Antranílico	$C_7 H_7 NO_2$	Acido Orto Aminobenzoico; 1-Amino-2-Carboxibenceno; Ácido 2-Aminobenzoico; Orto-Carboxianilina.
5	Acido Clorhídrico y/o Múriatico	HCl	Ácido Hidroclórico; Cloruro de Hidrógeno en solución acuosa.
6	Ácido Fórmico	$CH_2 O_2$	Ácido Metanoico; Ácido Hidroxicarboxílico.
7	Ácido Nítrico	HNO_3	Nitrato de Hidrógeno; Ácido Azótico; Hidróxido Nitrito; Ácido Fumante; Aqua Fortis.
8	Ácido Sulfúrico	$H_2 SO_4$	Ácido Sulfúrico; Oleúm; Ácido Sulfúrico Fumante; Sulfato de Hidrogeno; Aceite de Vitriolo; Ácido Sulfúrico diluido; Ácido Sulfúrico en solución; Ácido Tetraoxosulfúrico (VI); Tetraoxosulfato (VI) de Hidrógeno; Licor de Vitriolo; Espíritu de Vitriolo.
9	Amoníaco	NH_3	Amoniaco Anhidro; Gas Amoniacal; Amoniaco en solución; Solución Amoniacal; Hidróxido de Amonio.
10	Anhídrido Acético	$C_4 H_6 O_3$	Óxido Acético; Anhídrido del Ácido Acético; Óxido de Acetilo; Anhídrido Etanoico.
11	Benceno	$C_6 H_6$	Benzol; Benzole; Nata de Carbón; Pirabenzol; Naltu Mineral; 1,3,5-Ciclohexatrieno.
12	Carbonato de Sodio	$Na_2 CO_3$	Carbonato bisódico; Sal de Sosa cristalizada; Subcarbonato de Sodio; Carbonato Sódico neutro; Ceniza de Sosa Liviana; Sosa Calcinada; Cenizas de Perla; Carbonato Sódico Anhidro; Sosa del Solvay; Barrilla; Natrón Cristales de Soda.
13	Carbonato de Potasio	$K_2 CO_3$	Sal Tártara; Carbonato Bipotásico; Cenizas de Perla.
14	Cloruro de Amonio	$NH_4 Cl$	Sal de Amoniaco; Sal Amónica; Clorhidrato Amónico
15	Éter Etílico	$C_4 H_{10} O$	Óxido de Etilo; Óxido Dietílico; Éter anestésico; Éter Dietílico; Éter Sulfúrico
16	Hexano	$C_6 H_{14}$	Hexano Normal; N-Hexano; Hidrido de Caproilo; Hidrido Hexílico; Iso-Hexano y mezcla de isómeros

17	Hidróxido de Calcio	$Ca(OH)_2$	Hidrato de Calcio; Cal hidratada; Lechada de Cal Apagada; Cal Muerta.
18	Hipoclorito de Sodio	NaClO	Lejía Hipoclorito Sódico; Agua de Labarraque.
19	Isosafrol	$(CH_2\ OO)C_6\ H_3\ (CH{=}CHCH_3)$	1,2 Metilenodioxi 4-Propenilbenceno; 5-1 Propenil 1,3 Benzodioxol; 1,4-Diacetylbenzene; 1-(4-Acetyl-phenyl)-ethanone.
20	Kerosene	========	Petróleo Lampante; Aceite Mineral; Kerosina; Keroseno
21	Metil Etil Cetona	$C_4\ H_8\ O$	Methyl Ethyl Ketone; Butanona; 2-Butanona; MEK; Metilpropanona; Etilmetilcetona.
22	Metil Isobutil Cetona	$C_6\ H_{12}O$	Methyl Isobutyl Ketone; Isopropilacetona; Hexona; 4-Metil-2-Pentanona; MIBK.
23	Óxido de Calcio	CaO	Cal viva; Cal fundente.
24	Permanganato de Potasio	$KMnO_4$	Camaleón Mineral; Camaleón Violeta; Permanganato de Potasa; Sal de Potasio del Ácido Permangánico
25	Piperonal	$C_8\ H_6\ O_3$	Heliotropina; 3,4-Metilendioxi-Benzaldehido; Aldehidoperonílico; Carboxaldehyde; Heliotropin.
26	Safrol	$CH2OO(C6H3)\ CH2CH{=}CH_2$	1,2-Metilenodioxi 4-Alilbenceno; 4-Alil- 1.2 Metilenodioxy - Benzol; 5-2 Propenil - 1,3 Benzodioxol.
27	Sulfato de Sodio	$Na_2\ SO_4$	En la forma anhidra: Sulfato Sódico Anhidro; Sulfato Sódico Desecado; Torta de Sal; Thenardita (mineral). En la forma hidratada: Sulfato Sódico Decahidratada; Sal de Glauber; Mirabitalita (mineral); Vitriolo de Sosa.
28	Tolueno	$C_7\ H_8$	Toluol; Metil Benzol; Hidruro de Cresilo; Fenilmetano; Metilbenceno; Metacida.
29	Xileno	$C_8\ H_{10}$	Dimetilbenceno; Xilol; Orto-xileno; Meta-xileno; Para-xileno y Xilenos mixtos.
30	Ácido Sulfámico	$HSO_3\ NH_2$	Acido Sulfamídico o Acido Amidosulfúrico; Acido Amidosulfónico; Ácido Amidosulfúrico; Ácido Aminosulfónico.
31	Cloruro de Calcio	$CaCl_2$	Cloruro Cálcico; Dicloruro de Calcio; Cloruro de Calcio Anhidro.
32	Hidróxido de Sodio	NaOH	Hidróxido Sódico; Soda Cáustica; Sosa Cáustica; Sosa Lejia; Jabón de piedra; Hidrato de Sodio.
33	Metabisulfito de Sodio	$Na_2\ S_2\ O_5$	Pirosulfito Sódico; Disulfito de Sodio

Nota: Los insumos químicos y productos fiscalizados se nombran o denominan indistintamente conforme se tiene señalado, sin que el nombre o denominación sea limitante o excluyente de otros nombres o denominaciones comerciales, técnicas o comunes que sean utilizables para los mismos.

Fuente: (SUNAT, 2020)

ANEXO 6: Ficha técnica de la cal hidratada comercial de la marca ITICAL de la empresa CALCESUR





CAL HIDRATADA

IDENTIFICACIÓN DE PRODUCTO

Nombre del Producto	Cal Hidratada
Nombre Químico	Óxido de calcio
Fórmula Química	Ca (OH)2
Peso Molecular	74.10 g/mol
Densidad Aparente	0.30 – 0.50 t/m3



DESCRIPCIÓN

La cal hidratada se obtiene del proceso de hidratación de la cal viva, obteniéndose un polvo de color blanco de alta finura, muy liviana y caustico.

USOS El principal uso del (CaO)2:

- Tratamiento de aguas residuales.
- Aplicación en flotación de minerales.
- pH Ajuste de pH en aguas y suelos.
- Curtiembre, tratamiento de gases.
- Producción de azúcar, albañilería, construcción.
- Estabilización de suelos, entre otros usos.

CALCESUR

ESPECIFICACIONES COMPOSICIÓN QUÍMICA

Componentes químicos	Unidad	Especificación	Método de Ensayo
Hidróxido de calcio Ca(OH)2	%	>=80.0	NTP-334.131 / ASTM C25
Óxido de calcio (CaO total)	%	>=60.0	NTP-334.131 / ASTM C25
Dióxido de silicio (Si02)	%	<=5.00	NTP-334.177 / ASTM C1271
Óxido de magnesio (MgO)	%	<=1.80	NTP-334.177 / ASTM C1271
Humedad	%	<=1.50	NTP-334.131 / ASTM C25

GRANULOMÉTRICA

Nº de malla	Unidad	Valor	Método de Ensayo
Retenido. 30 (0.600 m)	%	<=3.00	NTP-334.168 / ASTM C110
Retenido. 200 (0.075 mm)	%	>=7.00	NTP-334.168 / ASTM C110

PRESENTACIÓN:

A granel camión silo (bombonas)



Sacos big bag 0.75 tm, y 1.0 tm y Sacos de 40 kg.



INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD Y MANEJO

Para efectos de manipulación de la Cal, se deben tener presente las siguientes precauciones:

- Use los equipos de protección personal adecuados para el manipuleo.
- La exposición al hidróxido de calcio por las vías de inhalación, contacto con la piel, ojos o por ingesta, pueden afectar el organismo.
- La exposición aguda a corto plazo, irritará ojos, nariz, garganta y piel. Los factores térmicos pueden ser constituyentes de quemaduras intensas, bronquitis y neumonía.
- La exposición a largo plazo puede producir dermatitis, úlceras y perforaciones al tabique nasal.
- En contacto con la piel puede llegar a producir irritación, quemaduras intensas, corrosión y posible daño severo.
- En contacto con los ojos produce quemaduras graves y pérdida de visión.
- Incompatible con ácidos fuertes tales como: clorhídrico, nítrico y sulfúrico.

