

**DISEÑO DE PLANTA Y EXPERIMENTACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE
CARBONATO DE CALCIO A PARTIR DE CÁSCARAS DE HUEVO**

Elaborado por:

Santos Obando Cristian Felipe

Chaparro Alvarez Nicole Adriani

Sierra Cañón Laura Alejandra

Directora:

Luisa Fernanda Carvajal Diaz

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Proyecto de Grado

14 de junio de 2024

Bogotá D.C, Colombia

Tabla de contenido

Resumen ejecutivo	4
Introducción.....	4
Objetivos	5
3.1 General	5
3.1.1 Específicos.....	5
Definición del problema	6
Justificación.....	6
Análisis de requerimientos	8
Marco de referencia.....	10
Análisis de restricciones	17
8.1. Disponibilidad de cáscaras de huevo.....	17
8.2. Tecnología y equipo	17
8.3. Normativas y permisos	18
8.4. Mercado y demanda de carbonato de calcio.....	18
Metodología.....	19
Análisis de costos	27
Antecedentes obtención carbonato de calcio.....	30
Resultados parciales obtenidos.....	35
Conclusiones	36
Referencias Bibliográficas	38

2. Tabla de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Partes del huevo. Nota. Adaptado de Controles De Calidad En Los Huevos, por @ruizpatoant, 2019, Alimentos (https://alimentosalubres.wordpress.com/2019/01/22/controles-de-calidad-en-los-huevos/).</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 2. Esquema de la unidad de separación por flotación de aire disuelto (DAF). Nota. Adaptado de “Utilization of calcium carbonate particles from eggshell waste as coating pigments for ink-jet printing paper.”, por Yoo, S., Hsieh, J. S., Zou, P., & Kokoszka, J., (2009), Bioresource Technology , 100 (24).</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 3. Diagrama de proceso. Nota. Elaboración propia.</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 4. Diagrama BFD. Nota. Elaboración propia.....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 5. Tanque agitador. Fuente: sistemasdepurificación.com.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 6. Molino para realizar la trituración. Fuente: gruberhermanos.com.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 7. Cristalizador. Fuente: Alibaba.com</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 8. Tamizador. Fuente: filtra.com</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 9. Equipo para el secado al vacío. Fuente: amixon.com</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 10. Preparación cáscaras de huevo. Fuente: Propia.</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 11. Disolución cáscaras de huevo. Fuente: Propia.</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 12. Filtración cáscaras de huevo. Fuente: Propia.</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 13. Agregado de ácido acético a cáscaras de huevo. Fuente: Propia.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 14. Reacción ácido acético con cáscaras de huevo. Fuente: Propia.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 15. Resultado final de la pulverización y purificación del carbonato. Fuente: Propia.</i>	<i>35</i>

Resumen ejecutivo

Este proyecto tiene como objetivo diseñar una planta para la producción de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo y la obtención de este a escala laboratorio, abordando un problema relacionado con la obtención de materias primas sostenibles y la gestión de residuos agroindustriales. El planteamiento del problema consiste en la necesidad de encontrar alternativas sostenibles y eficientes para la producción de carbonato de calcio. La importancia del carbonato de calcio en diversas industrias y su potencial para reducir residuos justifican esta propuesta. El marco de referencias abarcará todos los aspectos relevantes del proyecto, desde la producción de carbonato de calcio hasta la gestión de residuos agroindustriales. La metodología incluirá una revisión exhaustiva de la literatura y el desarrollo de un plan detallado para la producción de carbonato de calcio. Se identificarán los requerimientos necesarios para llevar a cabo el proyecto, incluyendo equipos y materiales, mientras que el análisis de restricciones permitirá identificar posibles limitaciones legales o de sostenibilidad que puedan afectar la viabilidad del proyecto.

Introducción

La cáscara de huevo es un material que protege al mismo, le da forma y puede venir en distintos colores. El huevo es un alimento muy común en el hogar de todas las personas a nivel mundial, todo lo que viene en su interior es consumido y lo que sobra es la cáscara la cual es normalmente desechada. A la parte blanca que compone la cáscara, en el interior del huevo, se le conoce como cutícula, la cual evita la porosidad de esta y así mismo previene la presencia de cualquier partícula que pueda generar una bacteria (Marti, 2022).

En cuanto al desarrollo del huevo, su recubierta (cáscara), es esencial ya que está compuesta principalmente de calcio. Esta recubierta es de un material compuesto por carbonato de calcio

(94%), carbonato de magnesio (1%), proteínas (1%), lípidos (1%) y humedad (1%) es un residuo doméstico que, en su mayoría, se desecha. La cáscara de huevo es un material muy resistente. Esta resistencia es necesaria para proteger al embrión en desarrollo del impacto y las lesiones, también tiene propiedades antibacterianas que ayudan a proteger al embrión de las infecciones, lo que hace que tenga muchos usos potenciales, tanto en el hogar como en la industria. (Biochemical Journal, 1986).

En cuanto a lo mencionado, la idea de este trabajo es el aprovechamiento de la cáscara de huevo con el fin de extraer el carbonato de calcio, donde aparte de darle un uso a un residuo, se contribuye al cuidado medioambiental.

Objetivos

3.1 General

Desarrollar un proceso de transformación que permita la extracción de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo.

3.1.1 Específicos

- Establecer los procesos necesarios para la obtención de carbonato cálcico considerando la cáscara de huevo como materia prima.
- Diseñar una planta de producción de carbonato de calcio a partir del tratamiento de cáscaras de huevo.
- Extraer carbonato cálcico a partir de cáscaras de huevo a escala laboratorio.

Definición del problema

Los residuos de cáscara de huevo son nocivos para el medio ambiente por su impacto medioambiental, ya que no se gestionan correctamente y esto afecta a la sostenibilidad ambiental por la cantidad de residuo acumulado que es desaprovechado por las grandes empresas que trabajan con el huevo (Bedoya & Valencia, 2020). Por ejemplo, la contaminación generada por la industria agroalimenticia es una cantidad exorbitante, ya que en la utilización de energía, el transporte de alimentos, generación de desechos como el estiércol de gallinas y las emisiones de gases que salen de fincas y granjas destinadas a la producción de alimentos; son cantidades muy grandes y contribuyen, según la Organización de Comida y Agricultura de las Naciones Unidas, al 30 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminación de suelos a nivel global (FAO, 2016).

El sector de la agroindustria es una fuente de contaminación bastante importante ya que la cantidad de energía utilizada y residuos generados es muy grande y contribuye al calentamiento global, la contaminación hídrica, la erosión de suelos; no solamente con los residuos de la producción, sino con la alimentación de las gallinas y su excremento, lo cual genera emisión de gases y afecta la capa de ozono (Laca & Diaz, 2021). Todo esto nos lleva al siguiente problema:

¿Cómo diseñar un proceso para la producción de carbonato de calcio utilizando cáscaras de huevo como materia prima y llevar a cabo su extracción a escala de laboratorio?

Justificación

Durante la última década, Colombia ha aumentado en un 48% en el consumo de huevos, con un promedio de 303 unidades por persona al año. Este dato coloca al país como el segundo mayor consumidor de huevos en la región, solo por detrás de México. El huevo se ha arraigado como un elemento esencial en la alimentación colombiana, representando un 2,5% en la

ponderación de alimentos en el Índice de Precios al Consumidor (IPC). Tanto la producción como el consumo de huevos continúan creciendo de manera constante, según los análisis de Juan Pablo Vega (2020).

El carbonato de calcio es un mineral versátil con una amplia gama de aplicaciones industriales. Se utiliza como materia prima clave en la fabricación de diversos productos, como tintes para impresoras, aditivos alimentarios para humanos y animales, y como componente en plásticos y materiales de construcción como tubos de PVC y cemento (Calcinor, 2020).

Dado el amplio espectro de aplicaciones industriales, la presencia del carbonato de calcio es fundamental en diversas industrias. Es esencial comprender el diseño de una planta dedicada a su producción, ya que su disponibilidad a precios competitivos podría beneficiar significativamente a las empresas. Esto se suma a la importancia de ajustar la granulometría de acuerdo con las especificaciones técnicas, tal como se detalla en la ficha técnica correspondiente (PMinerales Andina, 2023).

El proyecto de investigación se ocupa de un tema relevante: aprovechar las cáscaras de huevo, destacando su impacto en la sostenibilidad ambiental y la gestión de residuos orgánicos en la industria agroalimentaria. Se busca obtener un compuesto químico crucial, el carbonato de calcio (CaCO_3), fundamental en la fabricación de materiales de construcción, como plásticos y cementos, así como en la producción de aditivos para diversos productos. Se destaca que este compuesto es importante en la cáscara de huevo, representando cerca del 95% de su estructura (Bedoya & Valencia, 2020).

Este proyecto se centra en aprovechar la cáscara de huevo para producir carbonato de calcio, presentando beneficios significativos en cuanto a sostenibilidad ambiental y eficiencia en el uso de recursos. Al convertir un subproducto comparado desecado en un recurso valioso, se contribuye a la reducción de residuos orgánicos en la industria avícola, disminuyendo la carga en vertederos y

mitigando el impacto ambiental asociado. Además, el proyecto diversifica las fuentes de carbonato de calcio, ofreciendo una alternativa más sostenible y generando potenciales ingresos económicos al comercializar el producto. A su vez, la iniciativa aborda el impacto de la agroindustria al gestionar de manera más eficiente los residuos, contribuyendo a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y apoyando políticas sostenibles en la gestión de recursos. En resumen, el proyecto propone una solución integral que fusiona beneficios ambientales, económicos y sociales al transformar residuos en recursos valiosos y sostenibles.

Análisis de requerimientos

La obtención de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo en una planta ubicada en la ciudad de Bogotá debe abordar diferentes aspectos para poder garantizar el éxito del proyecto y su impacto positivo en el medio ambiente. La intención o propósito fundamental del producto se centra en brindar una solución integral y ambientalmente sostenible para contribuir a la gestión de residuos. Este enfoque se destaca por su responsabilidad con la utilización eficiente de las cáscaras de huevo como materia prima, contribuyendo así a la reducción de este residuo y a la promoción de acciones ambientalmente responsables. La visión del proyecto no solo se limita a la gestión sostenible de desechos, sino que se extiende a la producción de carbonato de calcio como un producto que tiene valor agregado en el mercado.

En primer lugar, se tiene que identificar el volumen de cáscara de huevo disponibles en la ciudad de Bogotá, considerando la generación del residuo en los restaurantes y otros establecimientos que tengan un alto consumo de huevo como lo son las panaderías. También, se debe evaluar viabilidad logística de la recolección, transporte y almacenamiento de las cáscaras y de esta manera asegurar un suministro constante con oportunidades de colaboración debido a la

ubicación estratégica para que el proceso de recolección sea más eficiente y que tenga acceso a los servicios industriales básicos necesarios para que la planta funcione de manera correcta.

Asimismo, se debe considerar profundizar en los aspectos técnicos del proceso, es decir todos los parámetros necesarios para la selección de las tecnologías y equipos especificando las dimensiones, materiales y referencias que se necesitan a escala industrial y de laboratorio para el funcionamiento adecuado de todo el proceso de obtención, en donde la claridad, la definición y el manejo de estas variables guiará la recolección y el análisis de todos los datos a lo largo de la ejecución del proyecto. Esto incluye aspectos como la trituración de las cáscaras, la separación de la membrana, la extracción del carbonato de calcio, entre otros. Cada operación y variables desempeña un papel específico en el proceso global y debe considerarse meticulosamente.

Para obtener carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo se consideran operaciones unitarias y variables con roles específicos.

Adicional, es fundamental definir con precisión las características técnicas y funcionales del producto final. Esto implica establecer la pureza deseada del carbonato de calcio y definir el tamaño de partícula, lo cual es crucial en la tecnología de los polvos debido a la variabilidad en la distribución granulométrica y las diversas formas de las partículas. Los polvos gruesos pueden generar problemas en comparación con los polvos finos, ya que las variaciones en la forma afectan el tiempo de preparación, la capacidad cuantitativa y las cualidades del producto final. Por lo tanto, la homogeneización del tamaño de las partículas es fundamental para garantizar la calidad del producto y su manejo eficiente en la industria, especialmente considerando las características específicas requeridas para cada producto (Oiso & Yamanaka, 2018). También, la distribución granulométrica adecuada, considerando propiedades físicas y químicas que determinen su comportamiento para las diferentes aplicaciones industriales previstas, siendo también esencial cumplir con las normativas y estándares de seguridad pertinentes, se deben establecer las

especificaciones de rendimiento, seguridad y calidad del producto, asegurando que cumpla con las normas y estándares relevantes, sea seguro para el usuario y el medio ambiente.

Marco de referencia

El huevo tiene muchas cualidades y conocer su estructura es relevante para la investigación, se constituye principalmente de la cáscara, la yema y la clara. La cáscara es una barrera que protege el contenido del huevo permitiendo el desarrollo del embrión del polluelo, en donde, está compuesta principalmente por una sección mineral (>95%), compuesta de cristales verticales de calcita (CaCO_3), y una matriz orgánica integrada (constituyendo del 1% al 3,5% del material restante), formando así una estructura compleja con características mecánicas sobresalientes. La formación se da en el útero de la gallina en más o menos 20 horas y consta de 3 etapas, la inicial, el crecimiento rápido y la terminación en las cuales se da la deposición de cristales de carbonato de calcio (Hernández-Hernández et al., 2008). Además, otra de las características de la cáscara de huevo es impedir la invasión de microorganismos y de manera tal actúa como barrera física para regular cambios de gases (Murakami et al., 2007). Por otra parte, la membrana de la cáscara de huevo está compuesta por 10 % de colágeno, 10% de glucosamina, 9% de condroitina, 5-10% de ácido hialurónico y 65% de aminoácidos (Aditya et al., 2021).

PARTES DEL HUEVO

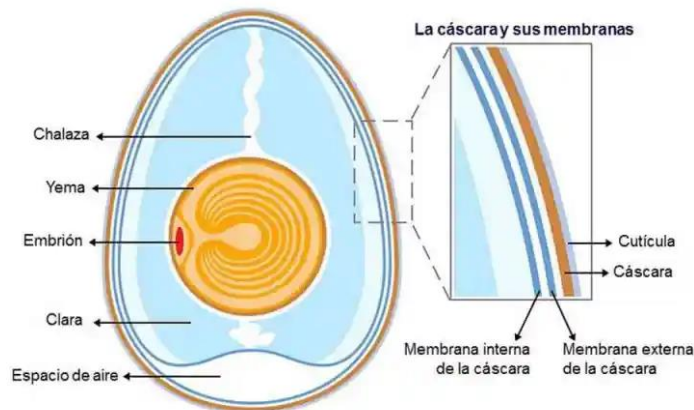


Ilustración 1. Partes del huevo. Nota. Adaptado de Controles De Calidad En Los Huevos, por @ruizpatoant, 2019, Alimentos (<https://alimentossalubles.wordpress.com/2019/01/22/controles-de-calidad-en-los-huevos/>).

La clara, también conocida como albumen, es la capa blanca que rodea la yema y representa aproximadamente el 60% del peso total del huevo. Está compuesta principalmente de agua, con pequeñas cantidades de proteínas, carbohidratos y minerales. Tiene dos funciones principales: proteger la yema y proporcionar nutrientes al embrión en desarrollo. Está formada por 4 capas que conforman el "saco albuminoideo", que incluye una capa fina interior fluida, una intermedia densa, una gruesa fluida y un fino exterior densa (IEH, 2023).

Por otro lado, la yema es la parte central y anaranjada del huevo, representando entre el 30% y el 33% del peso total del huevo. Está compuesta por grasa, proteínas y vitaminas, y contiene múltiples capas de vitelo blanco y amarillo, un disco germinal, una membrana vitelina y la latebra. La yema contiene las células germinales, donde ocurre la fecundación y el desarrollo embrionario. Este proceso es posible gracias a la riqueza de nutrientes que proporciona la yema para el embrión en desarrollo.

En los últimos años ha sido necesario buscar alternativas para crear y optimizar procesos más sostenibles, en donde se puedan utilizar algunos residuos para generar materias primas para

diversas industrias y aprovecharlos. La cáscara del huevo es una alternativa para ser la materia prima del carbonato de calcio, con múltiples usos industriales. En el mundo, Asia es el continente que más produce huevos, siendo China el mayor productor con el 38 % de la producción, en donde en las últimas 3 décadas la producción de huevos ha aumentado un 150 % (FAO, 2020). Según la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI), en el año 2022 el consumo per cápita fue de 315 huevos, lo que genera un gran número de cáscara de huevo como residuo, el cual no es lo suficientemente aprovechado. Por ese motivo ha habido varias investigaciones para estudiar sus posibles usos.

Según el artículo "Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática" por A. F. Moreno-Rojas, E. I. Moreno-Rojas, M. A. Ramírez-Silva y M. A. Pérez-Escobar. En el hogar, la cáscara de huevo se puede utilizar como abono al ser una buena fuente de calcio, un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas que se tritura y añade al suelo o a la composta, también para control de plagas se machaca y puede utilizarse para repeler caracoles, babosas y otros insectos ya que el carbonato de calcio, el componente principal de la cáscara de huevo, es un material duro que puede rayar o perforar el exoesqueleto de los insectos, lo que puede provocar su muerte, adicional a eso también sirve para el cuidado facial como exfoliante o mascarilla gracias al carbonato de calcio que ayuda a eliminar las células muertas de la piel, lo que puede ayudar a mejorar su textura y apariencia. También puede ayudar a reducir la aparición de manchas y arrugas, suavizar y tonificar la piel, gracias a que contiene calcio, hierro, fósforo y magnesio, todos los cuales son nutrientes esenciales para la salud de la piel. En la cocina como afilador de utensilios de cocina porque es un material abrasivo, el polvo de cáscara de huevo puede ayudar a afilar los cuchillos de acero inoxidable, acero al carbono y cerámica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el polvo de cáscara de huevo puede ser

abrasivo, por lo que es importante utilizarlo con cuidado. (Revista Colombiana de Ciencia Animal, 2022)

Bedoya y Valencia (2020) realizaron una investigación titulada "Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática". Su estudio se centró en revisar exhaustivamente investigaciones previas sobre el aprovechamiento de la cáscara de huevo en diversos sectores industriales como la farmacéutica, química, médica, cosmética y alimentaria. Destacaron que la cáscara de huevo, como materia prima única y altamente prometedora, ofrece una amplia gama de aplicaciones respaldadas por su componente principal, el carbonato de calcio. El proceso de preparación previo a su uso en diferentes industrias fue detalladamente analizado en su estudio. En el análisis se resaltó la importancia crucial del huevo en su totalidad, incluyendo la función vital desempeñada por su cáscara. Se reveló el potencial multifuncional y atractivo de la cáscara de huevo para investigadores y emprendedores interesados en soluciones innovadoras en el ámbito ambiental. Sin embargo, se planteó el desafío relacionado con la magnitud de residuos a nivel global, lo cual suscitó interrogantes sobre estrategias óptimas para la gestión y aprovechamiento eficiente de estos residuos.

En la industria, la cáscara de huevo se puede utilizar para fabricar materiales de construcción, productos cosméticos y otros productos. Los usos de la cáscara de huevo se basan en sus propiedades físicas y químicas, compuesta principalmente de carbonato de calcio, inerte y no tóxico. También contiene pocos minerales, como hierro, fósforo y magnesio. El uso de la cáscara de huevo en lugar de materiales tradicionales puede ayudar a reducir el impacto ambiental, ya que al utilizarla en vez de materiales tradicionales, se reduce la cantidad de residuos que van al vertedero y se reduce la necesidad de usar materiales contaminantes, al usar como abono para plantas ayuda a reducir la necesidad de fertilizantes sintéticos contaminantes, también se pueden

utilizar como exfoliante natural para la piel, ayuda a reducir la necesidad de productos cosméticos envasados, que pueden generar residuos. Las cáscaras de huevo también se pueden utilizar en medicamentos, cápsulas y tabletas, ya que el carbonato de calcio ayuda a encapsular los ingredientes activos de los medicamentos, y como materia prima para fabricar papel, ya que el carbonato de calcio mejora la resistencia y blancura del papel, o como aditivo para productos de plástico. (Revista Colombiana de Ciencia Animal, 2022)

Según el artículo "Uso del carbonato de calcio en la industria de plásticos y caucho" por A. F. Moreno-Rojas, E. I. Moreno-Rojas, M. A. Ramírez-Silva y M. A. Pérez-Escobar, el carbonato de calcio es ampliamente utilizado en la industria de plásticos y cauchos debido a su pureza y baja abrasividad. Se aplica como aditivo en el PVC rígido y plastificado, contribuyendo a conservar la maleabilidad y proporcionar resistencia en los cauchos. Además, puede convertirse en varias sales para mejorar su absorción por el cuerpo, como el citrato, fosfato, lactato y gluconato (Revista Colombiana de Ciencia Animal, 2022).

Dado el potencial de recuperación de residuos de cáscaras de huevo, se llevó a cabo un estudio por Yoo et al. (2009) titulado "Utilización de partículas de carbonato de calcio provenientes de residuos de cáscara de huevo como pigmentos de recubrimiento para papel de impresión por chorro de tinta", el cual presenta un tratamiento para recuperar bioproductos útiles a partir de las cáscaras de huevo y utilizarlo en productos comerciales, en donde para separar el carbonato de calcio de la cáscara del huevo y la membrana se utilizó el proceso por flotación por aire disuelto, después se investigaron diferentes métodos para eliminar la membrana restante y purificar más el carbonato proveniente de cáscaras de huevo (ECC). Se demostró que este método mejora la densidad óptica de tintas basadas en colorantes y disminuye la densidad de la tinta negra.

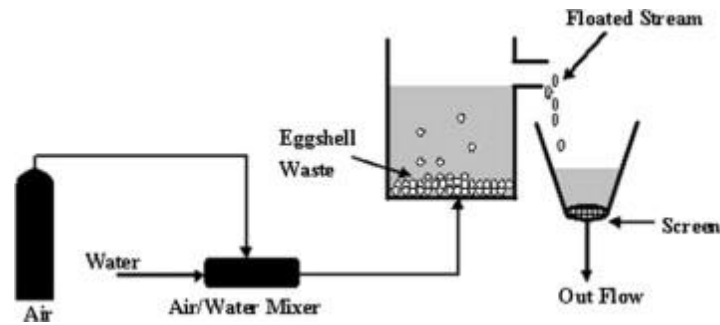


Ilustración 2. Esquema de la unidad de separación por flotación de aire disuelto (DAF). Nota. Adaptado de "Utilization of calcium carbonate particles from eggshell waste as coating pigments for ink-jet printing paper.", por Yoo, S., Hsieh, J. S., Zou, P., & Kokoszka, J., (2009), *Bioresource Technology*, 100 (24).

El carbonato de calcio (CaCO_3), obtenido de la extracción de la cáscara de huevo, es un compuesto químico inorgánico presente de forma natural en rocas y minerales, como la piedra caliza, así como en huesos y dientes de animales. Se caracteriza por su baja solubilidad en agua y se presenta en cristales incoloros o transparentes, mostrando una afinidad particular por reaccionar con ácidos, lo que lo convierte en un componente esencial tanto en aplicaciones industriales como en la vida cotidiana. Con una densidad de $2,71 \text{ g/cm}^3$ y un punto de fusión de $1.339 \text{ }^\circ\text{C}$, se clasifica como un compuesto básico y al disolverse en agua forma una solución alcalina. En la industria de la construcción, debido a sus propiedades, es empleado en la producción de cemento (PCC Group, 2022).

Según "Mercado global de carbonato de calcio: análisis de la industria, tamaño, participación, crecimiento, tendencias y pronóstico, 2023-2028" por Mordor Intelligence, publicado en 2023. Por lo que se refiere al mercado del carbonato de calcio mundialmente en el 2022 obtuvo un volumen de 8.80 millones de toneladas. Dada a la creciente demanda de elementos de construcción, papel, plásticos y como suplemento nutricional se espera que la demanda del carbonato también aumente. Además, en 2021 los principales exportadores fueron Bélgica, Malasia, Egipto, China y los importadores fueron, India, Alemania, Países bajos.

En el proceso de transformación de las cáscaras de huevo en carbonato de calcio, el primer paso es la limpieza adecuada de las cáscaras para eliminar cualquier presencia de salmonella u otros microorganismos. Esto se logra lavando las cáscaras con agua hirviendo o agua clorada repetidas veces, seguido de un hervido en agua desionizada durante 30 minutos. También se puede esterilizar las cáscaras en un autoclave esterilizador automático a 134°C durante 15 minutos. Una vez completada la limpieza, el siguiente paso es separar la cáscara del huevo y las membranas de la cáscara.

Existen varias formas de separar la membrana de la cáscara, como el pelado manual, aunque este método es lento y requiere mucho tiempo. Otro método eficaz es la separación por flotación por aire disuelto (DAF), que es un proceso no químico. Este método se basa en las diferentes velocidades terminales de la cáscara y su membrana debido a las diferencias en las gravedades específicas de ambas. La mezcla de aire y agua fluye desde el fondo del recipiente de separación, permitiendo que la membrana de la cáscara flote mientras que el carbonato de calcio, más pesado, se deposita en el fondo del recipiente (Yoo et al., 2009).

Otros métodos de separación incluyen el uso de ácido acético y el calentamiento por microondas, aprovechando las diferencias en el contenido de humedad entre la cáscara y la membrana. Estos métodos permiten una separación efectiva y son utilizados en el proceso de transformación de cáscaras de huevo en carbonato de calcio (Aditya et al., 2021).

La producción de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo involucra procesos como la molienda y el secado. Respecto a la molienda, se puede obtener un polvo de cáscara de tamaño nanométrico mediante una molienda inicial gruesa con un molinillo de cocina, seguida de una molienda adicional utilizando el molino de huesos PQ-N2 con transmisión por engranajes de 4 estaciones. Otra alternativa es utilizar un molino doméstico para mezclarlo con alimentos, pasando

las partículas a través de un tamiz de 40 mm. La molienda con bolas es reconocida como un método eficiente y respetuoso con el medio ambiente, según Aditya et al. (2021).

Análisis de restricciones

Como en todo proyecto, siempre habrá ciertas limitaciones que se deben identificar y evaluar para así evitar el que puedan llegar a afectar el desarrollo del proyecto. Dentro de las cuales podemos identificar:

8.1. Disponibilidad de cáscaras de huevo: Dado que el proyecto depende de las cáscaras de huevo como materia prima, la disponibilidad constante de cáscaras de huevo podría ser una restricción. Necesitaríamos asegurar una fuente confiable y constante de cáscaras de huevo. Bogotá, siendo la capital de Colombia, tiene una gran cantidad de restaurantes, mercados y hogares que podrían ser fuentes potenciales de cáscaras de huevo. Sin embargo, la recolección y el transporte de las cáscaras de huevo a la planta de producción podrían ser desafiantes. La logística de la recolección y el almacenamiento de las cáscaras de huevo necesitarán ser cuidadosamente planificadas.

8.2. Tecnología y equipo: La transformación de las cáscaras de huevo en carbonato de calcio requiere de tecnología y equipos específicos, los cuales se mencionan anteriormente en **Tabla 1. Variables del proceso** y **Figura 1. Diagrama BFD**. Su disponibilidad, mantenimiento del equipo y costos significan una restricción. Es posible que se necesite investigar proveedores locales o internacionales y considerar los costos de importación y mantenimiento. Además, hay que considerar que el proceso de transformación, ya a escala industrial, requiere de conocimientos técnicos específicos. Si no hay suficiente experiencia o habilidades en el manejo de equipos, esto podría ser una restricción, para lo cual sería necesario adquirir conocimientos técnicos específicos

para llevar a cabo el proceso de transformación. Esto a través de capacitaciones o la contratación de expertos.

8.3. Normativas y permisos: Es importante tener en cuenta las normativas y permisos específicos que se deben obtener para recoger y procesar cáscaras de huevo y así garantizar que el proyecto esté en cumplimiento con cada una de ellas. En Bogotá y Colombia, la normativa para el uso de residuos orgánicos en la industria, incluyendo la cáscara de huevo, se rige principalmente por:

- Ley 1259 de 2008: Establece disposiciones para la gestión integral de residuos sólidos y la responsabilidad compartida entre el Estado, los productores y los consumidores. (Congreso de la República, 2024)

- Decreto 1076 de 2015: Compila las normas ambientales y establece el marco para la gestión integral de residuos sólidos. (Secretaría Distrital de Ambiente, 2024)

- Guía Nacional para la Adecuada Separación de Residuos Sólidos: Proporciona directrices para la separación y gestión de residuos, incluyendo orgánicos, con el fin de fomentar el reciclaje y reducir el impacto ambiental. (DNP, 2022)

- Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS): Establece las estrategias para la gestión de los residuos sólidos en Bogotá, incluyendo los residuos orgánicos. (PGIRS, 2017)

8.4. Mercado y demanda de carbonato de calcio: Aunque el carbonato de calcio tiene muchas aplicaciones, es importante conocer sobre el mercado local y regional para este compuesto y así evaluar las posibles competencias y oportunidades de alianza. ¿Quiénes son los compradores potenciales?, ¿Existe suficiente demanda para justificar la producción? En Bogotá, existen varias

iniciativas y empresas que se dedican a la recolección y transformación de residuos orgánicos, incluyendo las cáscaras de huevo, tales como:

- UAESP (Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos): Esta entidad gubernamental tiene un proyecto de economía circular donde recolectan residuos orgánicos de diferentes conjuntos residenciales y comercios de frutas y verduras en varias zonas de la ciudad. Los residuos recolectados se transforman en abono para el suelo y siembra de plantas en Bogotá. (UAESP, 2022)

- La Colina Agrotecnología: Esta empresa se dedica al sector agrícola y destaca la importancia del uso de cáscara de huevo como un recurso valioso para la nutrición de plantas. (QUO, 2024)

- Eco-SHELL: Aunque no está ubicada en Bogotá, sino en Barcelona, esta es una iniciativa que se centra en la valorización de la cáscara de huevo. Utilizan un proceso patentado para obtener carbonato de calcio y membrana de la cáscara de huevo para su uso en diversos sectores industriales. Este proyecto es coordinado por Egnovo, la primera empresa europea que ha desarrollado un proceso industrial innovador para la utilización de la cáscara de huevo como materia prima. (ECO-SHELL, 2024)

- Ovosur: Esta empresa peruana, en colaboración con el Programa Innóvate Perú y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), ha desarrollado un proceso innovador para transformar las cáscaras de huevos en sales de calcio de alto valor alimenticio. (AVI NEWS, 2024)

Metodología

- Enfoque

Esta investigación se caracteriza por ser de naturaleza cualitativa, experimental y de diseño transversal. Se basa en la recopilación y análisis de información de diversas fuentes sin la manipulación controlada de variables. Este enfoque permite una comprensión profunda y detallada del tema estudiado, con la implementación de experimentos controlados. El diseño es transversal, ya que la investigación implica recolectar información estipulada en diferentes bases de datos, en un punto en el tiempo, proporcionando información de la situación en un momento específico, sin seguimiento longitudinal.

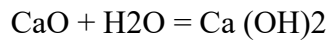
- Población

La población de estudio en este proyecto de investigación comprende las formas de obtener carbonato de calcio, mientras que la muestra se centra en obtener carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo. Esta muestra particular se selecciona para representar un caso específico dentro de la variedad de métodos disponibles para obtener este compuesto, permitiendo un análisis detallado y específico sobre la viabilidad, eficacia y ventajas de este enfoque particular en comparación con otras metodologías de obtención de carbonato de calcio.

- Métodos de obtención de carbonato de calcio:

- Carbonato de calcio precipitado (CCP): Este proceso implica la reacción de iones de calcio con iones de carbonato para producir cristales de carbonato de calcio de alta pureza y se obtiene por un proceso fisicoquímico que contienen tres etapas: calcinación, hidratación o apagamiento y carbonatación (Cales de Llierca, 2021).
- Calcinación: Consta de la descomposición de carbonato de calcio a óxido de calcio (cal viva) $\text{CaCO}_3 + \text{CALOR} = \text{CaO} + \text{CO}_2$ (Caleras San Juan, 2023).

- Hidratación o apagamiento: Consiste en un proceso de adición de agua al óxido de calcio para producir hidróxido de calcio. Es una reacción exotérmica que genera una gran cantidad de calor (Cales de Llerca, 2021).



- Carbonatación: La carbonatación consta de la introducción de dióxido de carbono en una suspensión acuosa de hidróxido de calcio denominada "lechada de cal" hasta precipitar el carbonato de calcio. (Cales de Llerca, 2021).



- Método de síntesis a partir de fuentes naturales: Este proceso implica la extracción directa de fuentes naturales de carbonato de calcio, puede ser a partir de la molienda piedra caliza y posterior purificación (Aguirre & Perez, 2019).

- Variables

Se identifican diversas variables que desempeñan roles específicos en la evaluación de la factibilidad y eficacia del proceso propuesto. La variable independiente consiste en el diseño de la planta de producción de carbonato de calcio, a incluir diferentes configuraciones y enfoques en los procesos de lavado, trituración, cristalización, tamizaje y secado al vacío. Las variables dependientes incluyen el rendimiento de la planta, medido en términos de cantidad y calidad del carbonato de calcio producido, la eficiencia del proceso en la extracción de carbonato de calcio a partir de las cáscaras de huevo, y el impacto ambiental, evaluando la reducción de residuos y la contribución a la sostenibilidad ambiental. Además, variables contextuales involucran la cantidad de residuos de cáscaras de huevo disponibles como materia prima en la zona de ubicación y factores

económicos para evaluar la viabilidad financiera del proyecto. La claridad en la definición y manejo de estas variables guiará la recolección y análisis de datos a lo largo de la ejecución del proyecto.

- Diseño

Se puede realizar la extracción del carbonato teniendo en cuenta el siguiente procedimiento a seguir:

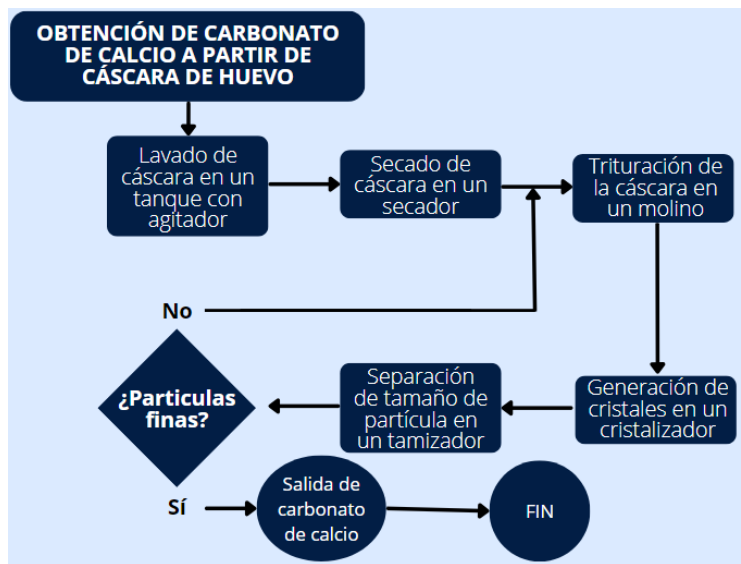


Ilustración 3. Diagrama de proceso. Nota. Elaboración propia.

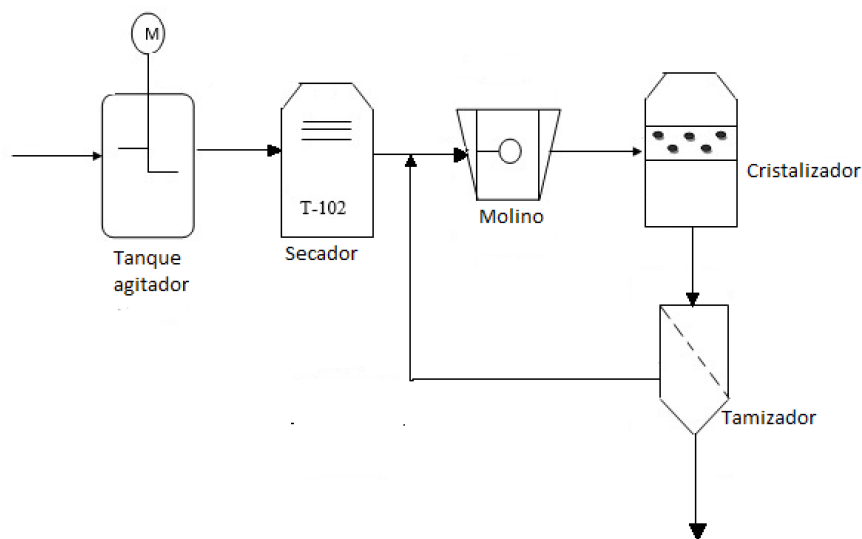


Ilustración 4. Diagrama BFD. Nota. Elaboración propia.

- Lavado de cáscaras: Este proceso se lleva a cabo en un tanque agitador utilizando agua a una temperatura cercana a los 100°C. El agua, en estado de ebullición, contribuye a la eliminación de microorganismos y bacterias presentes en la cáscara de huevo, preparándola así para la siguiente etapa del proceso de extracción de carbonato.



Ilustración 5. Tanque agitador. Fuente: sistemasdepurificación.com

- Trituración de cáscaras: Este paso implica el uso de un molino, una máquina industrial diseñada para moler un material específico a un tamaño de partícula determinado, el cual se le programa a esta en el momento de hacer el proceso. En este contexto, se emplea para moler la cáscara previamente desinfectada, ajustando los tamaños de partícula según las especificaciones del proveedor.

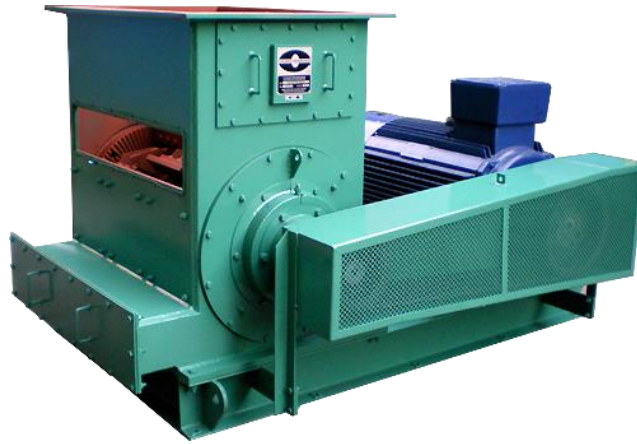


Ilustración 6. Molino para realizar la trituración. Fuente: gruberhermanos.com

- Proceso de cristalización: En este procedimiento, se lleva a cabo la evaporación del agua de un sólido, dando lugar a la formación de cristales. Este fenómeno está condicionado por el tamaño de partícula al que se haya ajustado previamente el molino (Cordochem, 2023). Este paso contribuye a la obtención de una fracción del carbonato de calcio.



Ilustración 7. Cristalizador. Fuente: Alibaba.com

- Proceso de tamizaje: En esta fase, se llevará a cabo la separación de los distintos tamaños de partículas generadas por el molino y que han atravesado el proceso de cristalización. Así, las partículas más pequeñas pasarán a través del tamiz, mientras que las partículas de mayor tamaño serán recirculadas al proceso de molienda (Estrada, 2022).



Ilustración 8. Tamizador. Fuente: filtra.com

- Secado al vacío: Este proceso marca la etapa final de la extracción de carbonato, evaporando por completo la poca presencia de agua restante en el sólido mediante el uso de temperaturas bajas. Este método garantiza un nivel óptimo de sequedad, lo cual es esencial para la comercialización a gran escala del producto. Además, este enfoque reduce la probabilidad de presencia de microorganismos, asegurando una extracción de carbonato altamente eficiente y de calidad para su uso posterior (Cordochem, 2023).



Ilustración 9. Equipo para el secado al vacío. Fuente: amixon.com

Tabla 1. Variables del proceso con definiciones. Nota: Elaboración propia.

CARACTERÍSTICA DEL PROCESO	EQUIPO	PROCESO
Proceso de lavado	Se realiza con un tanque agitador que contiene agua a 100 °C	El tanque retiene las cáscaras con agua hirviendo para eliminación de microorganismos donde realiza una agitación con una turbina axial a 150 rpm para la completa desinfección.
Proceso de trituración	Se realiza con un molino para la trituración de la cáscara	El molino micronizador realiza la operación de triturar hasta obtener un tamaño de partícula programado en este mismo dispositivo. Las cáscaras son agregadas desde la tolva donde caen a las cuchillas de pulverización según el tamaño que se desee.
Proceso de cristalización	Secado de carbonato para la creación de	Se utiliza un cristalizador DTB para la eliminación de humedad a través de la evaporación, lo cual genera un lecho fluidizado y se generan cristales de diferentes tamaños donde los pequeños se recirculan y vuelven al aparato quienes

	cristales a partir de un cristalizador	vuelven a hacer el mismo proceso para el aprovechamiento de los mismos y así se generan los tamaños de partícula adecuados.
Proceso de tamizado	Se realiza con un tamizador para separar los diferentes tamaños de partícula	Se utiliza un tamizador industrial de tipo "ZEUS" FTI-0550 que va a realizar la separación granulométrica del carbonato para obtener y aprovechar los diferentes tamaños de partícula generados anteriormente en el proceso de trituración y cristalización, el cual incluye la vibración y el movimiento dimensional necesario para el tamizado completo del carbonato obtenido.
Proceso de secado al vacío	Se elimina toda humedad por completo que haya quedado en los procesos anteriores	Con un secador al vacío de tipo AMT, se elimina completamente cualquier tipo de humedad que haya guardado el carbonato con anterioridad a bajas temperaturas, reduciendo también la presión ambiental y generando gránulos secos teniendo en cuenta la cantidad de volumen que se haya generado desde el proceso de trituración.

Análisis de costos

En cualquier ámbito de la ingeniería, la evaluación de la viabilidad económica de un proyecto es fundamental para que pueda llevarse a cabo y determinar su éxito. En el caso del diseño de una planta de carbonato de calcio, es bastante importante realizar un análisis de costos de manera detallada considerando varios aspectos como la inversión inicial y los costos operativos

recurrentes, ya que los procesos y sistemas operan a condiciones específicas. En donde, este análisis permitirá determinar la rentabilidad del proyecto y su potencial para generar utilidades.

Costos Directos:

1. Materiales Directos:

- Cáscaras de huevo
- Agua

2. Mano de Obra Directa:

- Operadores para el lavado de cáscaras
- Operadores para la trituración de cáscaras
- Operadores para el proceso de cristalización
- Operadores para el proceso de tamizaje
- Operadores para el secado al vacío

Costos Indirectos:

3. Costos Fijos:

- Arrendamiento o alquiler de la planta de producción
- Salarios administrativos y de supervisión
- Servicios públicos (electricidad, agua, gas)
- Mantenimiento de equipos y maquinaria
- Seguros de la planta y del personal
- Otros costos fijos asociados con la operación de la planta

4. Costos Variables:

- Costos de mantenimiento y reparación de equipos

- Costos de energía para los equipos de procesamiento
- Costos de agua y productos químicos para el lavado y cristalización
- Costos de transporte de materiales y productos

Tabla 2. Nómina de la planta de producción. Nota: Elaboración propia.

Cargo	Perfil	#	Salario nominal \$	Factor prestacional	Total, año \$
Operarios	Tecnólogo en química con 1 año de experiencia	14	\$ 2.500.000	1,8	\$ 756.000.000
Gerente general	Ingeniero químico con 6 años de experiencia en manejo de procesos y administración	1	\$ 17.000.000	x	\$ 204.000.000
HSEQ	Ingeniero químico certificado en HSEQ, 3 años de experiencia	2	\$ 7.000.000	1,6	\$ 268.800.000
Contador	Contador, 3 años de experiencia	1	\$ 5.000.000	1,6	\$ 96.000.000
Ing. de procesos	ingeniero de procesos con 3 años de experiencia	3	\$ 4.000.000	1,6	\$ 230.400.000
Ing. de mantenimiento	ingeniero mecánico, especialista en mantenimiento preventivo, 3 años de experiencia	1	\$ 5.000.000	1,6	\$ 96.000.000
				TOTAL	\$ 1.651.200.000

Tabla 3. Cotización equipos necesarios para la planta. Nota: Elaboración propia.

EQUIPOS	COSTO DOLARES	COSTO PESOS COLOMBIANOS	ENLACE
Tanque agitador homogeneizador	\$ 2.500,00	\$ 10.000.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/800L-1000L-SS304-mixing-tank-homogeneizador_1600216169748.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.1bf97276OPrppI
Secador	\$ 1.510,00	\$ 6.040.000,00	https://www.alibaba.com/product-detail/Plastic-Dryer-Shini-SHD-80U-Insulated_1600072724570.html?spm=a27

			00.galleryofferlist.p_offer.d_image.4b3d2100Nejidj&s=p
Máquina cristalizadora Oslo Dtb	\$ 10.000,00	\$ 40.000.000,00	https://spanish.alibaba.com/product-detail/Vacuum-1600425288231.html
Superfino molino de impacto	\$ 8.000,00	\$ 32.000.000,00	https://spanish.alibaba.com/p-detail/Superfine-60546107676.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.521827a2zi2Jsh&s=p
Tamizador zeus FTI 0550	\$ 5.000,00	\$ 20.000.000,00	https://www.amex-lab.bg/onlain-katalozi/filtra-vibracion.pdf
TOTAL	\$ 27.010,00	\$ 108.040.000,00	

Tabla 4. Costos materia prima y servicios. Nota: Elaboración propia.

Costos Materia Prima		\$/kg	kg/viaje	\$/año	\$/año	Precio total
Cáscara de huevo	\$2.312.000,00	\$700,00	\$115.200,00	\$18.250.000,00	\$1.916,67	\$4.431.333,33
Agua acueducto	\$2.665.700,00					\$12.755.442,80
Costos servicios						\$4.444.088,776,13
Energía eléctrica	\$71.082,6	\$656,58				\$46.671.672,72
Agua vertimiento	\$3.782.033,72	\$5,65				\$21.354.045,42

Antecedentes obtención carbonato de calcio

El martes 7 de mayo del 2024 se llevó a cabo una prueba de laboratorio en la cual se tenían los siguientes objetivos:

- Obtener carbonato de calcio puro a partir de cáscaras de huevo.
- Identificar las características físicas y químicas del carbonato de calcio obtenido.
- Evaluar la eficiencia del método de extracción.

La cual constó de los siguientes pasos:

5. Preparación de las cáscaras de huevo: Se inicia lavando 50g de cáscaras de huevo con agua y jabón para quitar residuos orgánicos, seguido de un secado al aire o en horno a 100 °C hasta estar secas y crujientes. Luego, se trituran en un mortero hasta obtener un polvo fino que se tamiza para homogeneizarlo.



Ilustración 10. Preparación cáscaras de huevo. Fuente: Propia.

6. Disolución del carbonato de calcio: Se añaden 50 ml de ácido clorhídrico diluido al carbonato de calcio, generando efervescencia por la reacción química para separar la membrana de la cáscara de huevo. La mezcla se calienta a 80 °C por 10 minutos con agitación y control de temperatura.



Ilustración 11. Disolución cáscaras de huevo. Fuente: Propia.

7. Filtración y lavado: Después de enfriar, se filtra el precipitado con un montaje de filtración por gravedad y se lava con agua fría para eliminar ácido clorhídrico residual.



Ilustración 12. Filtración cáscaras de huevo. Fuente: Propia.

8. Secado rápido del carbonato de calcio: Si se cuenta con equipo de vacío, se acelera el secado aplicando vacío al precipitado filtrado por 30 minutos. En caso contrario, se seca en un ambiente cálido y ventilado durante una hora.
9. Caracterización del carbonato de calcio: Finalmente, se retira el papel filtro con el carbonato de calcio, se pesa en una balanza analítica y se registra la masa para calcular la cantidad de carbonato de calcio obtenido.

Que una vez finalizados darían paso a las siguientes evaluaciones de propiedades:

- Solubilidad: Se evalúa la solubilidad del carbonato de calcio en agua a diferentes temperaturas para entender su comportamiento en disolución, observando si quedan residuos insolubles.
- Prueba de reacción con ácido acético: Se añade ácido acético a la muestra de carbonato de calcio para observar la efervescencia, indicativa de su pureza.



Ilustración 13. Agregado de ácido acético a cáscaras de huevo. Fuente: Propia.



Ilustración 14. Reacción ácido acético con cáscaras de huevo. Fuente: Propia.



Ilustración 15. Resultado final de la pulverización y purificación del carbonato. Fuente: Propia.

Resultados parciales obtenidos

La realización de la práctica de laboratorio para obtener carbonato de calcio puro a partir de cáscaras de huevo se enfrentó a una serie de desafíos que afectaron la obtención de los resultados deseados. Aunque los primeros pasos de preparación de las cáscaras de huevo y la disolución del carbonato de calcio se llevaron a cabo correctamente, se encontraron dificultades significativas en etapas posteriores debido a la falta de equipos especializados necesarios para el filtrado y secado adecuados. Sin embargo, se logró obtener carbonato de calcio, ya que el tamaño de partícula y el contenido de carbonato en las cáscaras de huevo permiten su fácil extracción. Esto demuestra que, pese a las limitaciones de equipo, la metodología es viable para la obtención de carbonato de calcio puro.

El ácido clorhídrico no presentó mucha eficacia en la reacción con la cáscara de huevo para la obtención de carbonato de calcio. Este inconveniente se vio agravado por el hecho de que en el diseño de planta elaborado no se incluyó un proceso que permitiera una reacción adecuada, dado

que no se contempló la incorporación de un reactor específico. La reacción con ácido clorhídrico fue considerada solo para fines experimentales en el laboratorio y no para una aplicación a escala industrial.

Sin embargo, el ácido acético mostró una efervescencia notable durante la reacción con las cáscaras de huevo, indicando una buena presencia de carbonato de calcio. Investigaciones en bases de datos respaldan esta observación, confirmando que la cáscara de huevo, compuesta en un 95% de carbonato de calcio, reacciona efectivamente con el ácido acético. De igual manera el diseño de la planta y la obtención de carbonato en este proyecto va enfocado a jugar con el tamaño de partícula de la cáscara y así obtener el carbonato de calcio por su presencia casi total en la cáscara.

Además, se logró obtener un tamaño de partícula muy pequeño, lo cual es consistente con otros estudios y experimentaciones en el campo. Estos estudios también han demostrado que el carbonato de calcio puede obtenerse eficientemente tanto por la reacción química como por la reducción del tamaño de partícula. La capacidad de obtener partículas finas de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo valida la metodología empleada y su potencial para aplicaciones prácticas, a pesar de las limitaciones encontradas con el uso del ácido clorhídrico y la falta de empleabilidad de equipos.

Conclusiones

En el presente trabajo final, se lograron cumplir con éxito los tres objetivos principales establecidos. En primer lugar, se realizó una investigación sobre los métodos existentes para la extracción de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo, identificando sus ventajas, desventajas y aplicaciones potenciales. Se seleccionó y describió en detalle el método de extracción a escala industrial considerando aspectos como la preparación de la materia prima, lavando las

cáscaras de huevo, secado, trituración, cristalización y separación mediante tamizaje, la separación del precipitado y la caracterización del carbonato de calcio obtenido. Mientras que para extracción en laboratorio se optó por el método de extracción con ácido clorhídrico, detallando la preparación de la materia prima, la reacción química, la separación del precipitado y la caracterización del producto obtenido, se analizaron los factores que afectan la eficiencia del proceso de extracción, como la concentración del ácido, la temperatura de reacción y el tiempo de reacción.

También se propuso el diseño una planta de producción de carbonato de calcio considerando el tratamiento de cáscaras de huevo, realizando un estudio de mercado para determinar la demanda potencial de carbonato de calcio y la viabilidad económica del proyecto. Se diseñó el diagrama de flujo de proceso para la planta de producción, considerando las etapas de recolección y transporte de cáscaras de huevo, molienda, separación de impurezas, filtrado, secado y obtención final. Se especificaron los equipos y la maquinaria necesarios para cada etapa del proceso, considerando aspectos como la capacidad de producción, los requerimientos de energía y los costos de inversión. Se realizó un análisis económico del proyecto, incluyendo la estimación de los costos de inversión, los costos operativos y los ingresos potenciales.

Por último, se llevó a cabo la extracción de carbonato de calcio a escala laboratorio, confirmando la presencia del compuesto mediante pruebas específicas como la reacción con ácido acético y la observación de las partículas obtenidas. Se llevó a cabo la práctica de laboratorio siguiendo el procedimiento establecido para la extracción de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo, con esto se obtuvieron resultados parciales que confirmaron la efectividad del método de extracción, evidenciando la presencia de carbonato de calcio en la muestra y obteniendo un tamaño de partícula pequeño, aunque se identificaron los desafíos técnicos que afectaron el

procedimiento, sí se obtuvo el carbonato de calcio en un tamaño de partícula pequeño y de manera exitosa.

Sin embargo, se reconoció que el ácido clorhídrico, si bien efectivo a pequeña escala para la verificación del carbonato de calcio, plantea preocupaciones ambientales significativas a una escala más amplia. Esto se debe a su potencial impacto negativo en el medio ambiente debido a la acidificación y a la generación de residuos ácidos, por esto, se diseñó un proceso industrial que prescinde completamente de agentes químicos. Este enfoque asegura la sostenibilidad ambiental del proceso de producción de carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo. Al eliminar el uso de ácidos en la producción a escala industrial, se evitan posibles riesgos ambientales y se promueve un proceso más limpio y eficiente.

Es importante destacar que, aunque se empleó ácido acético para fines de prueba y validación en el laboratorio, este tampoco forma parte del proceso industrial propuesto. En su lugar, se optó por un método que cumple con los estándares de sostenibilidad, utilizando únicamente técnicas mecánicas y físicas para la extracción y procesamiento del carbonato de calcio. Este enfoque no solo garantiza la viabilidad económica del proyecto, sino que también asegura que el proceso sea compatible con los principios de conservación ambiental y desarrollo sostenible planteados. Por lo tanto, la investigación no solo cumplió con los objetivos establecidos de obtener y caracterizar carbonato de calcio a partir de cáscaras de huevo, sino que también destacó la importancia de adoptar prácticas responsables para la producción industrial.

Referencias Bibliográficas

- Rodríguez, A. (2021) La cáscara de huevo: estructura, formación & qué factores afectan a su calidad. Revista aviNews Latam.

- Marti, M. (2022). La cáscara de huevo y sus propiedades en la salud. Hola.Com Lifestyle. Recuperado de: https://www.hola.com/estar_bien/20221207222424/cascara-huevo-propiedades-salud/
- Vega, J. (2018). *Consumo de huevo creció 48% en 10 años y cerrará el año en 293 unidades por colombiano*. Diario La República. Recuperado el 8 de marzo de 2024, de <https://www.larepublica.co/economia/consumo-de-huevo-crecio-48-en-10-anos-y-cerrara-el-ano-en-293-unidades-por-colombiano-2781321>
- Bedoya-Salazar, A., & Valencia-González, M. P. (2020). *Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (Gallus gallus domesticus): una revisión sistemática*. Revista Colombiana de Ciencia Animal RECIA. Recuperado de <https://doi.org/10.24188/recia.v12.n2.2020.776>
- Laca, A., Díaz, M., (2021). *Impactos ambientales derivados de la producción de huevos. Alternativas de mejora sostenible*. Instituto de Estudios del Huevo. (s. f.). https://www.institutohuevo.com/impactos-ambientales-derivados-de_la-produccion-de-huevos-alternativas-de-mejora-sostenible/.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food Climate Research Network. (2016). *Plates, pyramids, planet. Developments in national healthy and sustainable dietary guidelines: a state of play assessment*.
- Calcinor. (2020). *El Carbonato Cálcico y sus aplicaciones más sorprendentes. Parte I*. Minerales industriales; CALCINOR. <https://www.calcinor.com/es/actualidad/reviews-producto/carbonato-calcio-aplicaciones>
- PMinerales Andina. (2024). Recuperado el 8 de marzo de 2024, de <http://pmineralesandina.com.co/>

- Yoo, S., Hsieh, J. S., Zou, P., & Kokoszka, J. (2009). *Utilization of calcium carbonate particles from eggshell waste as coating pigments for ink-jet printing paper*. *Bioresource Technology*, 100(24), 6416–6421. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.112>
- Hernández-Hernández, A., Vidal, M., Gómez-Morales, J., Rodríguez-Navarro, A. B., Labas, V., Gautron, J., Nys, Y., & García-Ruiz, J. M. (2008). *Influence of eggshell matrix proteins on the precipitation of calcium carbonate (CaCO₃)*. *Journal of Crystal Growth*, 310(7–9), 1754–1759. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2007.11.170>
- Aditya, S., Stephen, J., & Radhakrishnan, M. (2021). Utilization of eggshell waste in calcium-fortified foods and other industrial applications: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 115, 422–432. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.047>
- Murakami, F. S., Rodrigues, P. O., De Campos, C. M. T., & Silva, M. a. S. (2007). Physicochemical study of CaCO₃ from egg shells. *Food Science and Technology*, 27(3), 658–662. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612007000300035>
- ESTRUCTURA | Instituto de Estudios del Huevo. (s. f.). https://www.institutohuevo.com/estructura_huevo/
- Oiso, T., & Yamanaka, S. (2018). Template-free synthesis and particle size control of mesoporous calcium carbonate. *Advanced Powder Technology*, 29(3), 606–610. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.12.001>
- Ley 1259 de 2008 Congreso de la República de Colombia. (s. f.). <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=34388>
- Marco jurídico - Secretaría Distrital de Ambiente. (s. f.). Secretaría Distrital de Ambiente. <https://www.ambientebogota.gov.co/marco-juridico1>
- Guía Nacional para la Correcta Separación de Residuos. (2021). Departamento Nacional de Planeación. Recuperado 8 de abril de 2024, de

<https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/guia-nacional-para-la-adecuada-gestion-de-residuos-colombia-2022.pdf>

- *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. (s. f.). Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP-. <https://www.uaesp.gov.co/planeacion-clasificacion-planes/pgirs>
- Córdo, B. L. A. A. T. R. o. E. A. j. C. (2022, 11 septiembre). *Bogotá le apuesta a transformar residuos orgánicos en abono ¡Te contamos cómo!* Bogota.gov.co. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/como-se-convierten-los-residuos-organicos-en-abono-en-bogota-video>
- Benítez, S. (2024, 31 marzo). *Cáscaras de huevo: El secreto natural para nutrir tus plantas* - Quo.mx. Quo.mx. <https://quo.mx/historia-y-cultura/para-que-sirve-la-cascara-de-huevo-en-las-plantas/>
- *Eco-SHELL, la valorización de la cáscara de huevo*. (s. f.). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Alimentaria/Articulos/143601-Eco-SHELL-la-valorizacion-de-la-cascara-de-huevo.html>
- De los Angeles Gutiérrez, M., & De los Angeles Gutiérrez, M. (2018, 6 mayo). *Innovador proyecto peruano transforma cáscaras de huevos en alimento*. aviNews, la Revista Global de Avicultura. <https://avinews.com/innovador-proyecto-peruano-transforma-cascaras-de-huevos-en-alimento/>
- Aguirre, G., Pérez, A. B., & Andara, R. A. (2019). PROPUESTA DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE CARBONATO DE CALCIO a PARTIR DE RESIDUOS DE CÁSCARAS DE HUEVO. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18625.20327>

- *¿Para qué sirven los molinos industriales?* (s. f.). Lancelot Digital.
<https://lancelotdigital.com/otras-noticias-de-interes/para-que-sirven-los-molinos-industriales>
- *Cristalizadores industriales al vacío para aguas residuales.* (2023). Condorchem Enviro Solutions. <https://condorchem.com/es/cristalizadores/>
- Estrada, E. (2022). *¿Qué es el tamizado industrial?* Recuperado de: <https://todosloshechos.es/que-es-el-tamizado-industrial>
- Spiegato. (2021). *¿Qué es el secado al vacío?* Recuperado de: <https://spiegato.com/es/que-es-el-secado-al-vacio>
- Timsa. (2023). *Agitadores industriales.* Recuperado de: <https://www.timsa.com/>
- Emjuvi. (2023). *Molinos industriales.* Recuperado de: <https://emjuvi.com/molinos-industriales/>
- Lusegil. (2020). *EQUIPOS CRISTALIZADORES / IPB II.* Recuperado de: <https://cursolusegil.blogs.upv.es/2020/04/06/equipos-cristalizadores/>
- Puritronic. (2021). *Tanque agitador / mezclador 300, 500 y 1000 lts. - Tratamiento de agua potable.* Recuperado de: <https://sistemasdepurificacion.com.mx/producto/tanque-agitador-500-lts/>
- Filtra Vibración (2023). *Tamizadora industrial circular ZEUS FTI-0550.* Recuperado de: <https://filtra.com/wp-content/uploads/2015/06/FLT-ZEUS-FTI0550.pdf>
- Gruber Hermanos (2023). *Molinos micronizadores industriales. Ventiladores Industriales Centrífugos y Axiales.* Recuperado de: https://www.gruberhermanos.com/productos_m_micronizacion.html.

- Alibaba (2023). *Máquina cristalina de evaporación al vacío industrial*. Recuperado de:
<https://spanish.alibaba.com/product-detail/Factory-62161210223.html?spm=a2700.7724857.0.0.289122512IgHfN>
- Amixon (2023). *Secado al vacío: ventajas y aplicaciones comunes*. Recuperado de:
<https://www.amixon.com/es/secado-al-vacio>
- ESTRUCTURA | Instituto de Estudios del Huevo. (s. f.).
https://www.institutohuevo.com/estructura_huevo/
- Cales de llerca. (2021). El carbonato de calcio precipitado en papel. Recuperado de:
<https://www.calesdellierca.com/es/aplicaciones/papel-carbonato-de-calcio-precipitado/#:~:text=El%20carbonato%20de%20calcio%20precipitado%20es%20el%20compuesto%20qu%C3%ADmico%20de,superior%20al%2099%25%20de%20CaCO3>
- Carbonato de calcio | MercadoLibre <https://listado.mercadolibre.com.co/carbonato-de-calcio>
- *Tarifas 2022*. (2024). Acueducto. Recuperado de
<https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/atencion-al-usuario/tarifas/tarifas2022>
- *Tarifas de energía*. (2024). Enel Colombia. Recuperado de,
<https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>