

Evaluación preliminar de sistema captura de CO₂ mediante reúso de residuos gravimétricos
auríferos

Cristian Libardo Lagos Vargas y Juan Camilo Gallardo Moreno

Trabajo de grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

MSc. en Ingeniería Metalúrgica

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

PhD. Ingeniería y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Stella y Gino, Por su amor incondicional, comprensión y paciencia durante esta etapa de mi vida, por su esfuerzo para darme todo lo necesario para alcanzar este objetivo, lo más importante para mí es hacerlos sentir orgullosos y que sepan que cada uno de mis logros es de ellos también.

A mi hermano, decirle que es una persona muy importante para mí, tu presencia en mi vida ha sido una fuente constante de alegría, de aprendizaje y de inspiración. Admiro tu valentía para enfrentar los desafíos, tu bondad para con los demás y tu capacidad para encontrar la luz incluso en los momentos más oscuros.

A Valentina, por hacer parte de esta etapa de mi vida, con tu presencia en gran parte de este trayecto recorrido todo fue mucho más fácil de conseguir, por tu gran apoyo, por tus palabras, por tu amor incondicional en los momentos en donde más lo necesitaba. Definitivamente tu presencia en mi vida en este tiempo fue una fuente de constante alegría, de aprendizaje, y de inspiración. Te admiro.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su ayuda a lo largo de este camino, por todo el amor y cariño recibido que siempre fue de gran ayuda en todo momento.

A mi compañero de proyecto de investigación, Cristian Lagos, por su gran ayuda y compañía en todo este proceso.

Dedicatoria

A mis padres, Libardo y Martha que me dieron toda la educación y los valores necesarios para ser lo que soy hoy, son mi motivación diaria y así mismo para que algún día se sientan orgullosos de todos los logros a conseguir y más que esto, de la persona que quiero ser.

A mi hermana, María Paula, la persona más importante en mi vida, con mylo obviamente que no puede faltar, la que me ha apoyado en todo, que siempre ha estado ahí para mí en todos los momentos que la he necesitado, y sobre todo por ayudarme con sus consejos a pesar de mis errores.

A mi familia, mis nonas que sé que deben estar orgullosas de su nieto, a mis tíos y mi tía que son personas que siempre me han apoyado, pero especialmente a mis dos tíos Pedro Alonso Vargas y Luis Alberto Lagos, que, aunque no estén en este mundo, desde donde estén van a estar orgullosos de su sobrino, que siempre me preguntaban y me apoyaban por culminar mi carrera profesional, como también a mi primo Mauricio, con el cual compartí muchos momentos a lo largo de este viaje.

A todos mis compañeros de la carrera que compartieron sus espacios conmigo, especialmente Ferney, Jose, Karen que son más que amigos y siempre voy a estar agradecidos por brindarme su amistad, a mi compañero de tesis y amigo, Camilo Gallardo por acompañarme en este proyecto y que las risas nunca faltaron.

A Juan Carlos, más que mi cuñado, un amigo que me ha brindado toda su amistad y que me ha ayudado no solo a mí, sino a toda mi familia.

Agradecimientos

A la Universidad industrial de Santander por hacer parte de nuestra formación como profesionales, y los más importante como personas.

A nuestro director Walter Pardave Livia y Codirector Pedro Luis Delvasto Angarita, por confiar en nuestras capacidades para la realización de este proyecto, y por cada tiempo brindado para aportar un granito de arena en los problemas climáticos presentados en la actualidad.

A los docentes de la escuela de ingeniería metalúrgica, por compartir sus conocimientos en cada uno de los espacios brindados, y sobre todo su voluntad de querer enseñar.

A los técnicos, personal de la escuela de ingeniería metalúrgica, por su disposición y tiempo prestado permitiendo que el proyecto culminara de una manera exitosa.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Fundamentación teórica.....	15
2.1 Residuos gravimétricos auríferos.....	15
2.2 Naturaleza química del adsorbato (CO ₂)	15
2.3 Proceso de captura de CO ₂ en clinkerización de la fabricación del cemento.	16
2.4 Reacciones del proceso clinkerización	17
2.5 Técnicas de separación y/o captura del CO ₂	18
2.6 Antecedentes de captura de CO ₂ con residuos gravimétricos auríferos	18
2.7 Pellets.....	18
3. Diseño y Metodología.....	19
3.1 Preparación de la materia prima.	19
3.2 Interacción del CO ₂ con los pellets de residuo gravimétrico aurífero.	19
3.3 Formación de ladrillo a partir de los pellets cargados de CO ₂	20
4. Resultados y Análisis	22
4.1 Análisis Físicoquímico del residuo mineral.....	22
4.2 Densidad aparente del pellet	24

4.3 Microscopía con Estereomicroscopio	25
4.4 Diseño de la columna de vidrio	27
4.5 Diseño del sistema de clinkerización y captura de CO ₂	28
4.6 Calcinación del carbonato de calcio en el proceso de clinkerización (CaCO ₃).....	30
4.7 Composición de pellets formados.....	32
4.8 Adsorción de CO ₂	35
4.9 Fabricación de material de construcción (Ladrillo)	40
5. Comparación del sistema realizado con otros métodos de adsorción.....	42
6. Conclusiones.....	43
7. Recomendaciones	45
Referencias Bibliográficas.....	46
Apéndices.....	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Análisis químico elemental semicuantitativo de los relaves mineros.....	23
Tabla 2. Análisis químico elemental del relave mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX).....	23
Tabla 3. Densidad aparente del pellet tipo 1 (80% residuo mineral y 20% carbón activado).	24
Tabla 4. Densidad aparente del pellet tipo 2 (50% residuo mineral – 50% carbón activado).	25
Tabla 5. Dimensiones de la columna de vidrio.....	28
Tabla 6. Especificación de las piezas del diseño del experimento	29
Tabla 7. Datos de calcinación del carbonato de calcio experimental (CaCO ₃)	31
Tabla 8. Datos de calcinación del carbonato de calcio teórica (CaCO ₃)	31
Tabla 9. CO ₂ producido teórico y experimental.	32
Tabla 10. Composición y parámetros de pellets formados.....	33
Tabla 11. Datos de adsorción de CO ₂ sin lecho de pellets.....	36
Tabla 12. Datos de adsorción de CO ₂ con lecho de pellets (80% residuo mineral – 20% carbón activado).....	37
Tabla 13. Datos de adsorción de CO ₂ con lecho de pellets (50% residuo mineral – 50% carbón activado).....	39
Tabla 14. Tabla Eficiencia del sistema de adsorción de CO ₂	40
Tabla 15. Composición del ladrillo.....	41
Tabla 16. Comparación del sistema realizado	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de producción de CO ₂ en un proceso de clinkerización.	16
Figura 2. Principales compuestos del Clinker.....	17
Figura 3. Proceso experimental en forma de diagrama.....	20
Figura 4. Proceso experimental etapa 1.	21
Figura 5. Diseño experimental etapa 2 y 3.	21
Figura 6. Diseño del sistema de adsorción de CO ₂	22
Figura 7. Pellet en estereoscopio (80% residuo mineral y 20% carbón activado).....	26
Figura 8. Pellet en estereomicroscopio (50% residuo mineral – 50% carbón activado)	26
Figura 9. Columna de vidrio vacía y con pellets	27
Figura 10. Sistema general del experimento realizado	29
Figura 11. Piedra caliza antes y después de la calcinación.....	31
Figura 12. Mezcla para elaboración de pellet tipo 1 y 2 respectivamente	34
Figura 13. Pellets formados en la peletizadora	34
Figura 14. Concentración de CO ₂ [ppm] en función del tiempo [min] sin lecho de pellets.....	37
Figura 15. Concentración de CO ₂ [ppm] en función del tiempo [min] con lecho de pellets (80%- 20%).....	38
Figura 16. Concentración de CO ₂ [ppm] en función del tiempo [min] con lecho de pellets (50%- 50%).....	40
Figura 17. Ladrillo a base de pellets cargados de CO ₂	41
Figura 18. Medidor de CO ₂	42

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Cálculos matemáticos	48
Apéndice B. Fotografía del picnómetro	49
Apéndice C. Fotografía de las partes del sistema experimental	50c
Apéndice D. Fotografía de pellets utilizados para el sistema experimental	52
Apéndice E. Sistema experimental para la medición de adsorción de CO ₂	53
Apéndice F. Fotografía del reactor después del proceso de clinkerización	54
Apéndice G. Fotografía del postenfriamiento del reactor utilizado en el sistema experimental. .	55

Glosario

Adsorción: La adsorción se describe como un enriquecimiento de especies químicas de una fase fluida sobre la superficie de un líquido o un sólido, mediante una fuerza física (fuerza de dispersión de London), este proceso no implica intercambio de electrones.

Carbonato de calcio (CaCO₃): Consiste en una sal de calcio del ácido carbónico, Se trata de un compuesto ternario, que entra en la categoría de las oxosales, se encuentra como parte de distintos minerales y rocas, pero también como parte periférica de distintos organismos vivos.

Clinkerización: Este proceso se realiza en un horno a elevadas temperaturas, donde se trata la piedra caliza con otros componentes provocando así las reacciones químicas que dan lugar a la formación de los minerales hidráulicos.

Pellets: Se emplea para caracterizar una gama de conglomerados con formas bien definidas, en particular, de naturaleza esférica, que son generados de manera sistemática y se obtienen a partir de diversos materiales.

Residuos gravimétricos auríferos: son los materiales remanentes después del procesamiento de minerales auríferos mediante técnicas de separación basadas en la gravedad, como la concentración por mesa vibratoria, espirales u otros métodos similares. Estos residuos contienen partículas de oro u otros minerales valiosos que no fueron recuperados eficientemente durante la operación gravimétrica principal.

Resumen

Título: Evaluación preliminar de sistema de captura de CO₂ mediante reuso de residuos gravimétricos auríferos*

Autores: Cristian Libardo Lagos Vargas y Juan Camilo Gallardo Moreno**

Palabras clave: Adsorción, residuo gravimétrico aurífero, pellets, clinkerización, pirolisis, adsorción.

Descripción:

El agente principal del cambio climático es el dióxido de carbono (CO₂), el cual está estrechamente vinculado, principalmente, a la ignición de combustibles fósiles y a las operaciones de la industria del cemento que implican la clinkerización de piedra caliza. Esta última actividad se encuentra en una incesante expansión, lo que contribuye significativamente a un aumento continuo en la concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre. En este proyecto, se lleva a cabo la evaluación de un sistema expresamente construido para la captura de dióxido de carbono (CO₂) producido en la industria cementera. En este proceso, se emplea residuos gravimétricos auríferos junto con carbón activado para formar pellets y utilizarlos como material adsorbente, mientras que el CO₂ actúa como adsorbato. La generación controlada de CO₂ se realiza mediante la clinkerización de carbonato de calcio (CaCO₃) dentro de un reactor construido con acero galvanizado y conectado por medio de tuberías de cobre. La construcción del sistema de esta manera tiene como objetivo mitigar las posibles pérdidas de gas durante las operaciones del horno tipo mufla.

Los resultados obtenidos después de realizar las pruebas evidenciaron que los pellets tipo 1 alcanzaron una eficiencia de adsorción de 7,526%, y los pellets tipos 2 lograron una eficiencia adsorción de 10,267%

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales Director Walter Pardavé Livia MSc. en Ingeniería Metalúrgica Codirector Pedro Luis Delvasto Angarita PhD. Ingeniería y Tecnología de Materiales

Abstract

Title: Preliminary evaluation of a CO₂ capture system through reuse of gravimetric gold waste*

Author: Cristian Libardo Lagos Vargas y Juan Camilo Gallardo Moreno**

Key Words: Adsorption, gravimetric gold residue, pellets, clinkerization, pyrolysis, absorption.

Description:

The main agent of climate change is carbon dioxide (CO₂), which is closely linked, mainly, to the ignition of fossil fuels and to cement industry operations that involve the clinkerization of limestone. This last activity is in incessant expansion, which contributes significantly to a continuous increase in the concentration of CO₂ in the Earth's atmosphere. In this project, the evaluation of a system expressly built for the capture of carbon dioxide (CO₂) produced in the cement industry is carried out. In this process, gold-bearing gravimetric waste is used together with carbon activated to form pellets and use them as an adsorbent material, while CO₂ acts as an adsorbate. The controlled generation of CO₂ is carried out through the clinkerization of calcium carbonate (CaCO₃) inside a reactor built with galvanized steel and connected by copper pipes. The construction of the system in this way aims to mitigate possible gas losses during muffle furnace operations.

The results obtained after carrying out the tests showed that type 1 pellets reached an adsorption efficiency of 7.526%, and type 2 pellets achieved an adsorption efficiency of 10.267%

* Project the Grade

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales Director Walter Pardavé Livia MSc. en Ingeniería Metalúrgica Codirector Pedro Luis Delvasto Angarita PhD. Ingeniería y Tecnología de Materiales

Introducción

Estamos atravesando uno de los mayores desafíos en la actualidad: Cambio climático; el cual se quiere atacar y abordar con éxito. A diario se están presentando manifestaciones por parte del planeta, de los cambios y transformaciones que está sufriendo, afectando la economía de la sociedad, producción de alimentos hasta el punto de ser situaciones catastróficas que cause la mortalidad tanto en personas como en animales.

Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos gases que absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo. Los principales gases que se encuentran en la atmósfera terrestre son el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y el ozono (O₃). Estos se producen de manera natural y son esenciales para mantener una temperatura ideal en la tierra ayudando a la supervivencia humana y animal. En la atmósfera está creciendo gradualmente y de forma rápida la concentración de los gases, donde el dióxido de carbono (CO₂) se destaca por ser uno de los que más se impulsa e incrementa a medida que pasa el tiempo. Este gas tiene una particularidad ya que es uno de los que concentra más calor respecto a los demás. La industria cementera es una de las fuentes más grandes en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) siendo aproximadamente un 8% del mundo, según el centro de estudios británico Chatham House. Si la industria cementera fuera un país, sería el tercer emisor más grande del mundo, detrás de China y EE. UU. (BBC News Mundo, s.f.)

Teniendo en cuenta la problemática, se pretende esta evaluación preliminar de sistema de captura CO₂ mediante reúso de residuos gravimétricos auríferos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general.

Evaluar el reúso de residuos gravimétricos mineros para la captura de dióxido de carbono producido por la clinkerización del cemento y posterior obtención de ladrillo con pellets cargados.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar fisicoquímicamente una muestra de residuo aurífero como material adsorbente.

Construir a escala de laboratorio un sistema con residuos auríferos para la absorción del dióxido de carbono generado por la clinkerización de cemento.

Medir a partir de un dispositivo electrónico la capacidad de adsorción del sistema mencionado.

2. Fundamentación teórica

2.1 Residuos gravimétricos auríferos.

Los residuos gravimétricos auríferos (relaves mineros), son un subproducto común del proceso de recuperación del metal aurífero (oro). En general, consiste en un lodo líquido compuesto de agua y partículas finas de metales y minerales. Se crea cuando el mineral extraído se tritura y se muele finamente en el proceso de molienda. Los residuos están compuestos por suspensión fina de sólidos, es decir, una mezcla de sólidos y agua. Estos residuos son provenientes de los procesos de concentración gravimétrica para la extracción del oro y están constituidos por el material que se extrae del yacimiento, donde se ha extraído la parte valiosa del mineral. (ICMM, s.f)

2.2 Naturaleza química del adsorbato (CO₂)

Los factores como: su tamaño (volumen, masa y peso molecular), estructura química, solubilidad, relación hidrofobicidad / hidrofiliicidad, su reactividad, afinidad relativa entre solución y adsorbente, favorecen o afectan la adsorción del adsorbato durante los procesos fisicoquímicos presentes.

Dentro de las características fundamentales que distinguen un buen adsorbente están su alta porosidad, el área superficial, su fuerte unión química en el medio que se va a utilizar. (Valladares-Cisneros, Valerio Cárdenas, De la Cruz Burelo, & Melgoza Alemán, 2018).

2.3 Proceso de captura de CO₂ en clinkerización de la fabricación del cemento.

La captura de CO₂ comienza con el proceso de clinkerización (Clinker) para la producción de cemento. Para la producción de clinker se calcina la piedra caliza, compuesta esencialmente de carbonato cálcico (CaCO₃), a unos 900°C para silicatos, aluminatos y ferritas de calcio, principales constituyentes del clinker.

A 900 °C sucede la primera reacción durante el proceso de producción de clinker, el cual es la calcinación (Oficemen, s.f) (Ver figura 1):

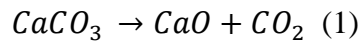
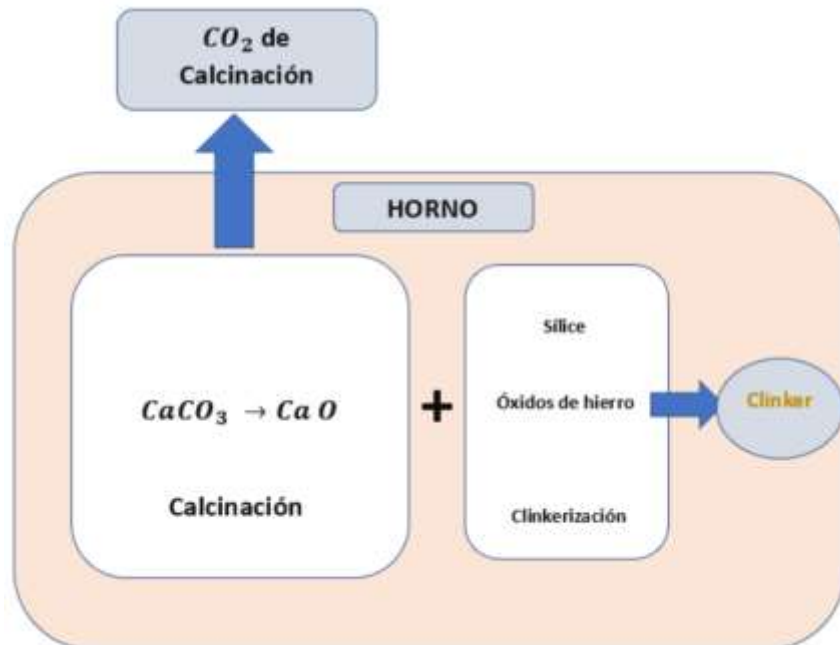


Figura 1.

Esquema de producción de CO₂ en un proceso de clinkerización.



2.4 Reacciones del proceso clinkerización

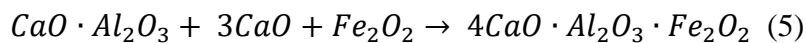
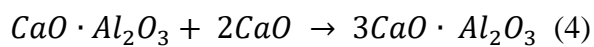
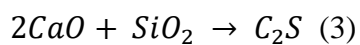
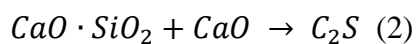
En el proceso de fabricación del clinker, el CaO reacciona en el horno a altas temperaturas (entre 1400-1500 °C) con sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxidos de hierro (Fe₂O₃), para formar silicatos, aluminatos y ferritas de calcio, principales constituyentes del Clinker (Oficemen, s.f) (Ver Tabla 1).

Figura 2.

Principales compuestos del Clinker.

Nombre	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO· SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO· Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO· Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Las reacciones que ocurren en el proceso de clinkerización son las siguientes:



La reacción más importante durante la cocción del clinker de cemento es la formación de silicato tricálcico (6) (360 en concreto. s.f.).



2.5 Técnicas de separación y/o captura del CO₂

Las tecnologías actuales de captura se basan en métodos físicos o químicos. En los métodos físicos, el CO₂ se absorbe en diferentes condiciones de presión y de temperatura por un sólido o un líquido y es liberado por los absorbentes en descompresión y/o calentamiento. Hay tres principales enfoques tecnológicos para la captura de CO₂: post-, oxi- y precombustión. (Ambiente, D. M., & Plaza, 2009; Cortés Pizarro, 2013)

2.6 Antecedentes de captura de CO₂ con residuos gravimétricos auríferos

En el 2019 en Chile, se presentó una propuesta de captura, transporte y almacenamiento de dióxido de carbono en relaves líquidos iónicos y carbonatación mineral (Valderrama, Campusano, Espindola, Valderrama, Campusano, & Espindola, 2019).

2.7 Pellets

Es un material compuesto por arcilla (SiO₂) y otros subproductos. Se caracteriza por tener una gran propiedad de absorción de grandes cantidades de moléculas en proteínas de soluciones acuosas. Debido a su composición y su morfología, su superficie cuenta con microporos, poros y macro poros generados durante la producción de este que permiten que la propiedad de absorción sea una de sus cualidades (German, & Ávila, s.f.; García Rico, 2023)

3. Diseño y Metodología

El residuo gravimétrico se caracterizó por medio de análisis próximo, el cual permite: caracterización fisicoquímica, gravimétrica, microscópica y mineralógica del residuo gravimétrico aurífero.

La parte experimental del proyecto se llevará a cabo durante las siguientes etapas

3.1 Preparación de la materia prima.

El residuo gravimétrico aurífero, piedra caliza, se obtendrán por medio de un proveedor local. Posteriormente, el residuo gravimétrico aurífero pasará a un proceso de tamizado, para luego transformarlo en pellets con la ayuda de un aglomerante como lo es el carbón activado por medio de un disco peletizador.

3.2 Interacción del CO₂ con los pellets de residuo gravimétrico aurífero.

En esta etapa, los pellets de residuo gravimétrico aurífero formados anteriormente, se depositan en el sistema columna para ponerlos en contacto con el dióxido de carbono que proviene del proceso de clinkerización realizado en el horno tipo mufla.

3.3 Formación de ladrillo a partir de los pellets cargados de CO₂

En la tercera etapa, los pellets de residuos gravimétricos auríferos cargados de CO₂ provenientes de la etapa anterior, se mezclarán con arena, y cemento. El producto de esta mezcla se compactará en pequeños moldes para posteriormente llevarlos al horno tipo mufla (secado, cocción) para obtener el producto final (Ver figura 3).

Figura 3.

Proceso experimental en forma de diagrama

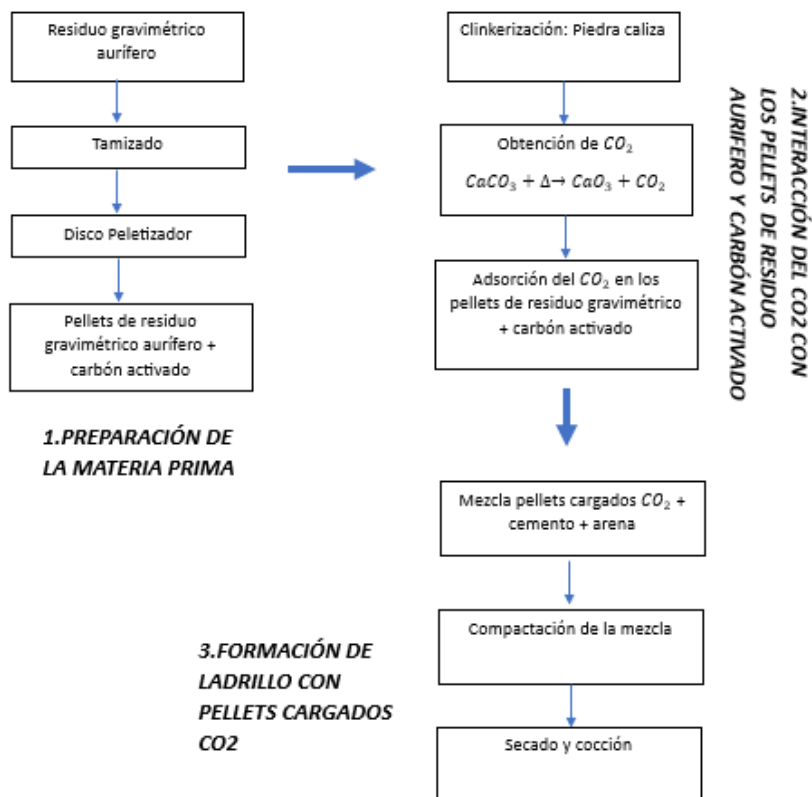


Figura 4.

Proceso experimental etapa 1.



Figura 5.

Diseño experimental etapa 2 y 3.

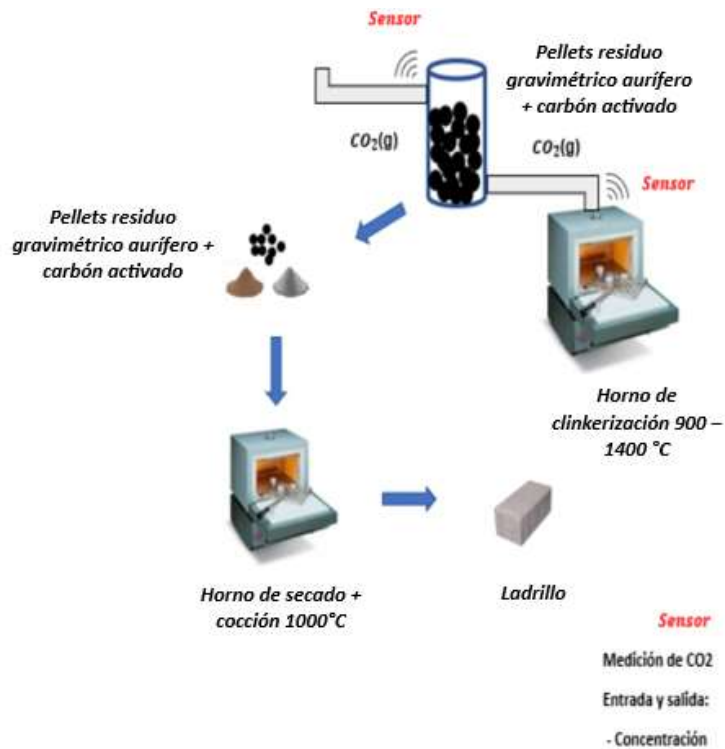
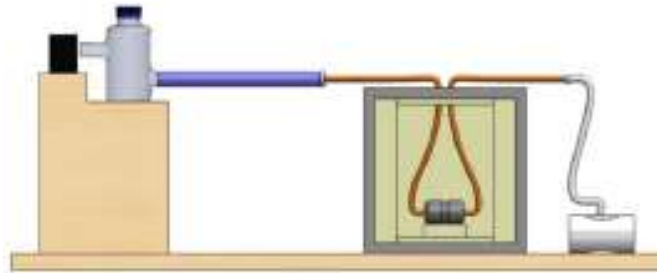


Figura 6.

Diseño del sistema de adsorción de CO₂



Nota. Tomado de: García Rico (2022) Tesis de grado Ingeniero Metalúrgico Universidad Industrial de Santander

4. Resultados y Análisis

Nota general. * Durante todo el análisis se habla de carbonato de calcio y piedra caliza, los cuales hacen referencia al mismo compuesto *.

4.1 Análisis Físicoquímico residuo mineral.

En este apartado está expuesta la caracterización físicoquímica realizada a los relaves mineros gravimétricos auríferos por medio de las técnicas de espectrometría de dispersión de energía de Rayos-X (EDS), fluorescencia de rayos X (FRX), y caracterización microscópica y SEM.

En la tabla 2 y 3 respectivamente se muestran los resultados obtenidos del análisis químico elemental semicuantitativo del relave minero utilizando los ensayos de EDS y FRX

Tabla 1.

Análisis químico elemental semicuantitativo de los relaves mineros

Elemento	Punto A		Punto B	
	%p/p	At%	%p/p	At%
C	10,81	17,06	9,48	20,99
O	45,29	53,69	26,75	44,48
Al	1,26	0,88	2,96	2,92
Si	40,92	27,63	19,58	18,54
S	0,35	0,21	-	-
K	0,44	0,21	1,44	0,98
Fe	0,94	0,32	1,01	0,48
Mg	-	-	0,37	0,4
Zr	-	-	38,41	11,2

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Tabla 2.

Análisis químico elemental del relave mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX).

Elemento	Número atómico(Z)	Concentración	óxido	Concentración
Si	14	36,81%	SiO ₂	78,75%
Al	13	5,32%	Al ₂ O ₃	10,05%
K	19	4,83%	K ₂ O	5,82%
Fe	26	1,24%	Fe ₂ O ₃	1,78%
Na	11	0,27%	TiO ₂	0,36%
Mg	12	22,00%	MgO	0,36%
Ti	22	0,22%	Na ₂ O	0,36%
Ba	56	0,15%	BaO	0,17%
Ca	20	0,04%	P ₂ O ₅	0,07%
P	15	0,03%	CaO	0,06%
Zr	40	0,02%	SO ₃	0,05%
Si	16	0,02%	ZrO ₂	0,03%
Cu	29	0,02%	CuO	0,02%
Sr	38	0,02%	SrO	0,02%
Mn	25	0,01%	MnO	0,02%
As	33	0,01%	As ₂ O ₃	0,02%
Rb	37	0,01%	ZnO	0,02%
Zn	30	0,01%	Rb ₂ O	0,01%

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

4.2 Densidad aparente del pellet

La tabla 4 presenta la densidad aparente (promedio) determinada para un pellet aurífero – carbón activado, se realizaron tres pruebas para determinar su densidad, obteniendo resultados muy similares entre sí, donde evidencia homogeneidad entre los pellets realizados en el laboratorio. El método para obtener estos resultados fue el del picnómetro y la masa utilizada fue correspondiente a dos pellets. Por la siguiente ecuación (1) se determinó el volumen real (ml), con el cual se calculó la densidad aparente con la ecuación (2):

$$V = X - Y \quad (1)$$

Donde:

X: Peso picnómetro con agua + masa del pellet (g)

Y: Picnómetro + pellet sumergido agua (g)

Densidad aparente: $\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$

Tabla 3.

Densidad aparente del pellet tipo 1 (80% residuo mineral y 20% carbón activado).

Prueba	Masa de 2 pellets (g)	(X) Peso picnómetro con agua + masa del pellet (g)	(Y) Picnómetro + sumergido en agua (g)	Volumen real (ml)	Densidad (g/ml)
1	3	52.078	49.944	2.134	1.405
2	3	52.090	49.960	2.130	1.408
3	3	53.060	50.937	2.123	1.413
PROMEDIO					1.408

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Tabla 4.

Densidad aparente del pellet tipo 2 (50% residuo mineral – 50% carbón activado).

Prueba	Masa de 2 pellets (g)	(X) Peso picnómetro con agua + masa del pellet (g)	(Y) Picnómetro + sumergido en agua (g)	Volumen real (ml)	Densidad (g/ml)
1	2	51.050	48.917	2.133	0.937
2	2	51.105	48.704	2.401	0.832
3	2	50.809	48.519	2.290	0.873
PROMEDIO					0.880

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

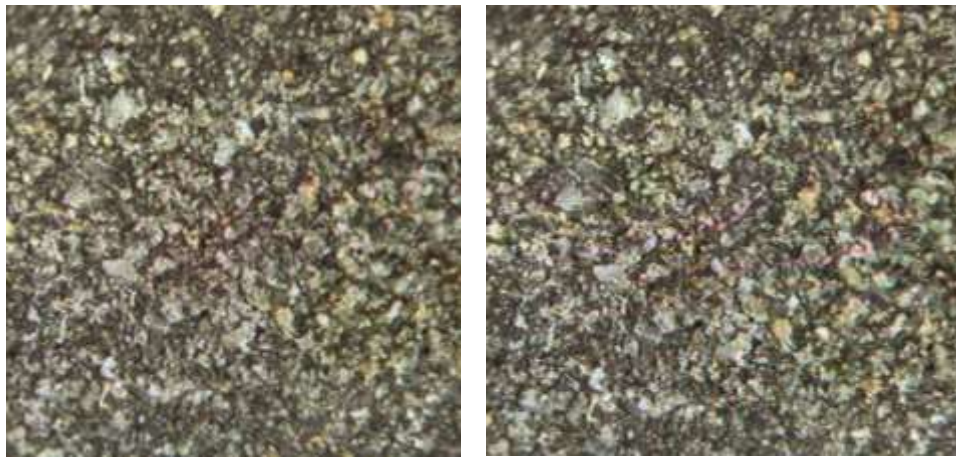
4.3 Microscopia con Estereomicroscopio

Para obtener información sobre la superficie del pellet y su fisonomía, se tomaron imágenes antes de las pruebas como después de estas mismas, donde se puede apreciar vacíos o poros para uso como adsorbente. El estereomicroscopio utilizado fue Olympus SZ61 con un aumento de 20X.

Las siguientes imágenes ilustran pellets antes y después de la prueba en el estereoscopio a 20X respectivamente.

Figura 7.

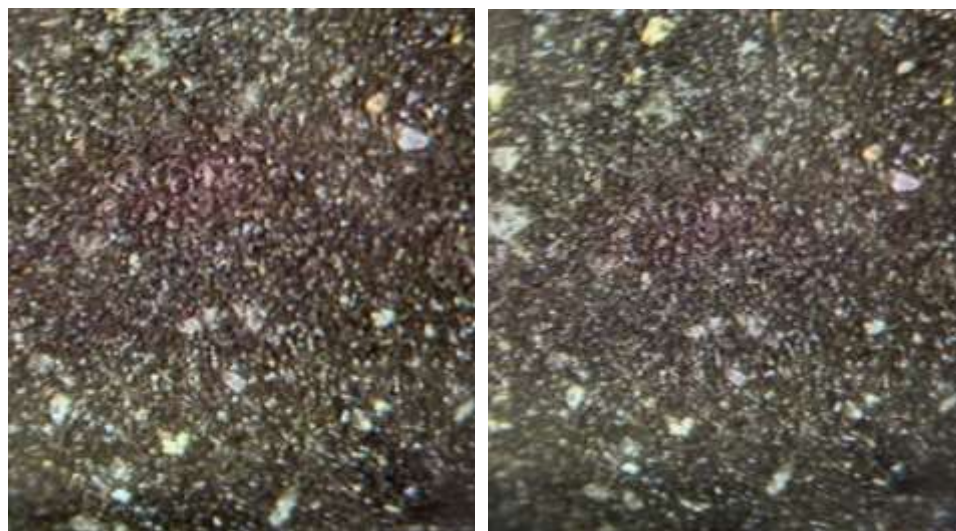
Pellet en estereoscopio (80% residuo mineral y 20% carbón activado)



Nota. Estereomicroscopio Olympus SZ61 de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica UIS.

Figura 8.

Pellet en estereomicroscopio (50% residuo mineral – 50% carbón activado)



Nota. Estereomicroscopio Olympus SZ61 de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica UIS.

4.4 Diseño de la columna de vidrio

Se realizó el diseño de la columna con las dimensiones, capacidad y tipo de material adecuado para realizar posteriormente las pruebas de laboratorio. La columna de vidrio consta de ocho (8) cm de diámetro y catorce (14) cm de altura. Además, posee dos orificios de dos punto seis (2.6) cm de diámetro, uno en la parte superior y otro en la parte inferior de la columna de vidrio, que cumplen la función de entrada y salida de CO₂. La columna de vidrio está hecha de borosilicato (pyrex) material que resiste temperaturas hasta 300 °C. Esta columna cuenta igualmente con una tapa (color azul) con cuatro (4) cm de diámetro y tres (3) cm de altura, la cual está fabricada en polietileno. En la figura 8 se tiene la columna de vidrio vacía e igualmente con los pellets utilizados en la prueba para absorber el CO₂ respectivamente. El lecho de pellets dentro de la columna de vidrio es de 10.24 cm o cuatro pulgadas (4 in).

Figura 9.

Columna de vidrio vacía y con pellets



Tabla 5.*Dimensiones de la columna de vidrio*

Pieza	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm³)	Material
Columna	8	14	703	Vidrio Pyrex
Tapa	4	3	-	Polietileno

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

4.5 Diseño del sistema de clinkerización y captura de CO₂.

En la figura 9 está representado el diseño del sistema general del experimento, en el cual uno de los objetivos era reducir las pérdidas de CO₂ que se produce en el proceso de clinkerización, teniendo en cuenta que en el horno se pueden presentar pérdidas por diferentes razones (refractario desgastados, orificios sin conexión, etc.). La tabla 7 se encuentra cada una de las partes del diseño general.

El diseño está constituido inicialmente por un nebulizador que permite inyectar aire por medio de una manguera la cual está en el sistema para expulsar de forma adecuada el CO₂, es importante decir que este no interfiere en los resultados o datos finales. Siguiendo, tenemos la tubería de cobre (1 cm de diámetro y 100 cm de longitud) que van conectadas a los costados del reactor. Este último (reactor) es de acero galvanizado (4.5 cm de diámetro y 7,2 de longitud) el cual va dentro del horno, donde va a ocurrir la clinkerización. La tubería de cobre va conectada a una manguera siliconada (soporta temperaturas hasta 180°C) con longitud de treinta (30) cm y un diámetro de 2.7 cm, el cual va conectado al conducto inferior de la columna de vidrio. Las conexiones y los empalmes se hicieron por medio de tuercas, reducciones, teflón, este último se utilizó para asegurar las conexiones y evitar fugas. Por último, tenemos el medidor de CO₂

colocado en frente del conducto superior de la columna de vidrio permitiendo tomar los datos de forma correcta.

Figura 10.

Sistema general del experimento realizado



Tabla 6.

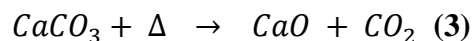
Especificación de las piezas del diseño del experimento

<i>N°</i>	<i>Piezas</i>
1	Nebulizador
2	Tubería de cobre
3	Reactor
4	Manguera siliconada
5	Columna de vidrio con pellets
6	Dispositivo medidor de CO ₂

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

4.6 Calcinación del carbonato de calcio en el proceso de clinkerización (CaCO₃)

Cuando se realizan procesos de clinkerización, suceden reacciones como la calcinación, donde se obtiene la cal viva y el CO₂, este último es el objetivo por atrapar. Con el fin de calcular experimental y teóricamente la cantidad de CO₂ que podría ser obtenido, se realizaron 3 pruebas diferentes con diferentes composiciones, en la primera prueba se realizó sin lecho de pellets, la segunda prueba con un lecho de pellets (80% residuo mineral – 20% carbón activado) y la tercera con lecho de pellets (50% residuo mineral – 50% carbón activado); igualmente se realizó el balance de descomposición y así poder comparar los resultados teórico-experimental. La temperatura del proceso fue de 900 °C, y el tiempo de fue de noventa (90) minutos. La reacción endotérmica, indica la descomposición térmica del carbonato de calcio CaCO₃ consiguiendo la formación de la cal viva (CaO) y dióxido de carbono (CO₂).



Pruebas experimentales

- Prueba 1 (Sin lecho de pellets)
- Prueba 2 (Lecho de pellets 80% residuo mineral – 20% carbón activado)
- Prueba 3 (Lecho de pellets 50% residuo mineral – 50% carbón activado)

Teniendo en cuenta que la piedra caliza común en Santander ronda en un promedio de 88,2 % y 97,91% de CaCO₃, donde el restante lo compone como el óxido de Magnesio (MgO) entre otros, arrojando así los siguientes resultados y balanceando la descomposición del carbonato de calcio:

Tabla 7.*Datos de calcinación del carbonato de calcio experimental (CaCO₃)*

#Prueba	Piedra Caliza (g)	CaCO ₃ inicial – 88% (g)	CaO producido (g)	CO ₂ producido (g)	CaO (%)	CO ₂ (%)	Temperatura °C	Tiempo (min)
1	65.37	57.52	34.43	23.09	59.86	40.14	900	90
2	50.23	44.20	27.59	16.61	62.43	37.57	900	90
3	58.92	51.84	31.62	20.22	61	39	900	90

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.**Tabla 8.***Datos de calcinación del carbonato de calcio teórica (CaCO₃)*

#Prueba	Piedra Caliza (g)	CaCO ₃ inicial – 88% (g)	CaO producido (g)	CO ₂ producido (g)	CaO (%)	CO ₂ (%)	Temperatura °C	Tiempo (min)
1	65.37	57.52	32.22	25.29	56.01	43.99	900	90
2	50.23	44.20	24.76	19.43	56.05	43.95	900	90
3	58.92	51.84	29.04	22.79	56.01	43.99	900	90

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.**Figura 11.***Piedra caliza antes y después de la calcinación.*

Tabla 9.*CO₂ producido teórico y experimental.*

# Prueba	CO ₂ Producido		Eex (%)
	Valor experimental (g)	Valor Teórico (g)	
1	23.09	25.29	8.69
2	16.61	19.43	14.5
3	20.22	22.79	11.2

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Se halló el error experimental porcentual del CO₂ producido con la siguiente ecuación (Ver Tabla 10):

$$Eex = \frac{ValorTeórico - ValorExperimental}{ValorTeórico} * 100$$

4.7 Composición de pellets formados

Los pellets formados en la peletizadora del laboratorio de Beneficio de minerales de la Escuela de Ingeniería metalúrgica UIS, se elaboraron dos tipos de pellets a base de relave aurífero minero (colas y medios) y carbón activado, pero con diferente composición. El pellet tipo 1 es de 80% residuo de mineral y 20% carbón activado. Se realizó una mezcla de 400 gr (320 gr residuo de mineral y 80 gr de carbón activado). El pellet tipo 2 es de 50% residuo de mineral y 50% carbón activado. Igualmente se realizó una mezcla de 400 gr (200 gr residuo mineral y 200 gr de carbón activado). Este mineral utilizado fue obtenido después de pasar por un proceso de trituración, molienda y en el tamizado, se utilizó malla 70, posteriormente fue pasado por la mesa vibratoria (wilfley) para obtener los medios y las colas del mineral. La cantidad de agua necesaria para el

pellet tipo 1 fue de 18 ml y para el pellet tipo 2 fue de 15 ml. Este líquido ayudó a la homogenización de la mezcla durante el ejercicio de peletización. Las condiciones de la peletizadora fueron de siete (7) RPM y con un ángulo de cuarenta grados (40°). Una vez obtenidos los pellets se midieron, obteniendo un diámetro promedio de 12.9 mm y un peso final para el pellet tipo 1 de 320 gr y para el tipo 2 de 225 gr, teniendo en cuenta las pérdidas de materia prima que se dan en la peletizadora durante el proceso de peletización.

Tabla 10.

Composición y parámetros de pellets formados

Tipo pellet	Composición Pellets [%]	Porcentaje [%]	Peso [g]	Velocidad de peletizadora [RPM]	Ángulo de peletizadora [°]	Diámetro promedio [mm]
1	Mineral	78	320	7	40	12.9
	Carbón activado	19				
	Agua	3				
2	Mineral	49	225	7	40	12.9
	Carbón Activado	49				
	Agua	2				

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Figura 12.

Mezcla para elaboración de pellet tipo 1 y 2 respectivamente



Figura 13.

Pellets formados en la peletizadora



4.8 Adsorción de CO₂

Uno de los objetivos del proyecto es lograr disminuir la emisión de CO₂ en el medio ambiente por tanto así evitar que aumenten los efectos generados por el cambio climático generados por estos mismos gases de efecto invernadero. Es por esto, se evaluó a partir de los pellets elaborados y el diseño de captura realizado, la capacidad de captura del gas (CO₂) proveniente del proceso de clinkerización y a su vez la calcinación de la piedra caliza. La adsorción entre un sólido (pellet) y un gas (CO₂), se da por las moléculas de gas que se mantienen unidas a la superficie del sólido, esto debido a las fuerzas de Van der Waals, definiendo así las características de este comportamiento que es la adsorción. Se realizaron 3 pruebas con peso de CaCO₃ correspondiente al 88% de la piedra caliza, en la prueba (1) se hizo sin lecho de pellets, con un CaCO₃ inicial (57.520 g) y una vez realizada la prueba, se tomaron los datos finales arrojando un resultado de cal viva (CaO) de (34.430 g), teniendo en cuenta la reacción dada, se tuvo la cantidad de peso producido correspondía al gas (CO₂) de 23.090 g. La prueba (2) se hizo con lecho de pellets (80% mineral – 20% carbón activado) teniendo CaCO₃ inicial (44.20 g), arrojando un resultado de cal viva (CaO) de (27.59 g) y la cantidad de gas producido (CO₂) de (16.61 g). En la prueba (3) se hizo con lecho de pellets (50% mineral – 50% carbón activado) teniendo CaCO₃ inicial (51.84), arrojando un resultado de cal viva (CaO) de (31.62 g) y una cantidad de gas producido (CO₂) de (20.22 g). (La concentración de CO₂ arrojada por el dispositivo se tomó en diecinueve (19) momentos diferentes durante los noventa (90) minutos, registrando un total de 23.079 g CO₂/m³.

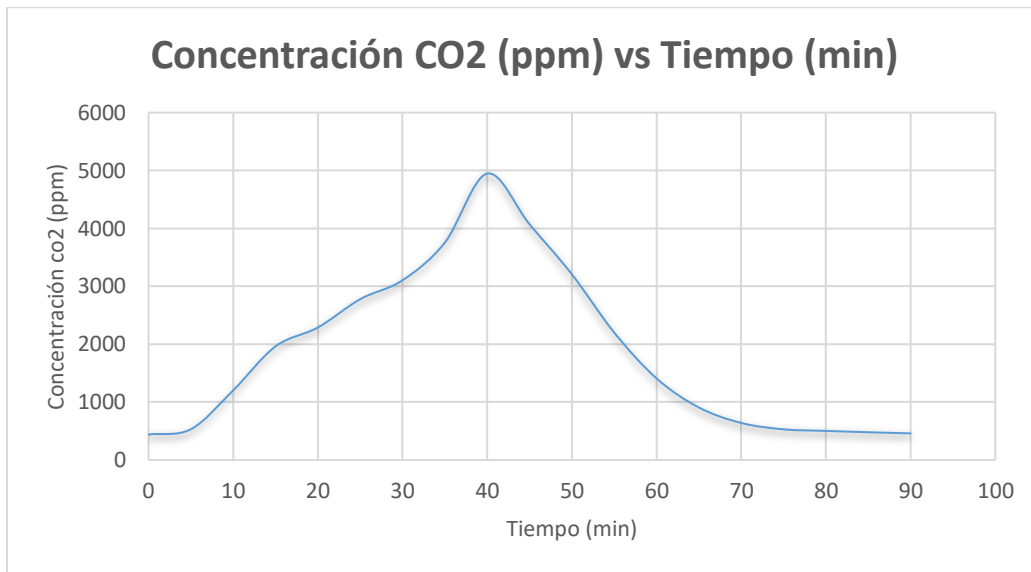
Tabla 11.*Datos de adsorción de CO₂ sin lecho de pellets*

Prueba	Concentración de CO₂ (ppm)	Concentración de CO₂ (g/m³) de aire	Tiempo (min)	CaCO₃ inicial (g)	CaO final (g)	CO₂ producido (g)
	440	0.286	0			
	532	0.3458	5			
	1203	0.78195	10			
	1963	1.27595	15			
	2289	1.48785	20			
	2778	1.8057	25			
	3104	2.0176	30			
	3756	2.4414	35			
	4947	3.21555	40			
1	4368	2.6455	45	57.520	34.430	23.090
	3207	2.08455	50			
	2201	1.43065	55			
	1409	0.91585	60			
	907	0.58955	65			
	640	0.416	70			
	530	0.3445	75			
	503	0.32695	80			
	480	0.312	85			
	460	0.299	90			
Total		23.080				

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Figura 14.

Concentración de CO₂ [ppm] en función del tiempo [min] sin lecho de pellets



Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Tabla 12.

Datos de adsorción de CO₂ con lecho de pellets (80% residuo mineral – 20% carbón activado)

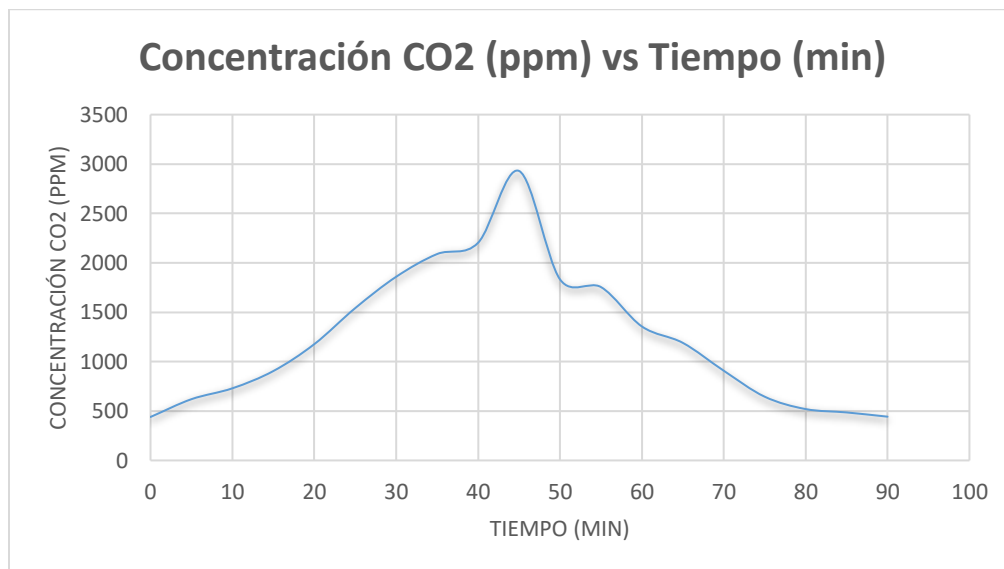
Prueba	Concentración de CO ₂ (ppm)	Concentración de CO ₂ (g/m ³) de aire	Tiempo (min)	CaCO ₃ inicial (g)	CaO final (g)	CO ₂ producido (g)
	440	0.286	0			
	620	0.403	5			
	730	0.4745	10			
	905	0.58825	15			
	1177	0.76505	20			
	1542	1.0023	25			
2	1859	1.20835	30	44.20	31.62	16.61
	2089	1.35785	35			
	2203	1.43195	40			
	2930	1.9045	45			
	1833	1.19145	50			
	1755	1.14075	55			
	1356	0.8814	60			

Prueba	Concentración de CO ₂ (ppm)	Concentración de CO ₂ (g/m ³) de aire	Tiempo (min)	CaCO ₃ inicial (g)	CaO final (g)	CO ₂ producido (g)
	1190	0.7735	65			
	908	0.5902	70			
	645	0.41925	75			
	520	0.338	80			
	486	0.3159	85			
	443	0.28795	90			
Total		15.360				

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Figura 15.

Concentración de CO₂ [ppm] en función del tiempo [min] con lecho de pellets (80%-20%)



Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Tabla 13.*Datos de adsorción de CO₂ con lecho de pellets (50% residuo mineral – 50% carbón activado)*

Prueba	Concentración de CO₂ (ppm)	Concentración de CO₂ (g/m³) de aire	Tiempo (min)	CaCO₃ inicial (g)	CaO final (g)	CO₂ producido (g)
	440	0.286	0			
	650	0.422	5			
	840	0.546	10			
	1007	0.654	15			
	1390	0.903	20			
	1650	1.072	25			
	2089	1.357	30			
	2807	1.824	35			
	3007	1.954	40			
3	3620	2.353	45	51.84	27.59	20.22
	2710	1.761	50			
	2030	1.319	55			
	1502	0.976	60			
	1190	0.773	65			
	910	0.591	70			
	617	0.401	75			
	509	0.330	80			
	486	0.315	85			
	460	0.299	90			
Total		18.144				

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Figura 16.

Concentración de CO₂ [ppm] en función del tiempo [min] con lecho de pellets (50%-50%)

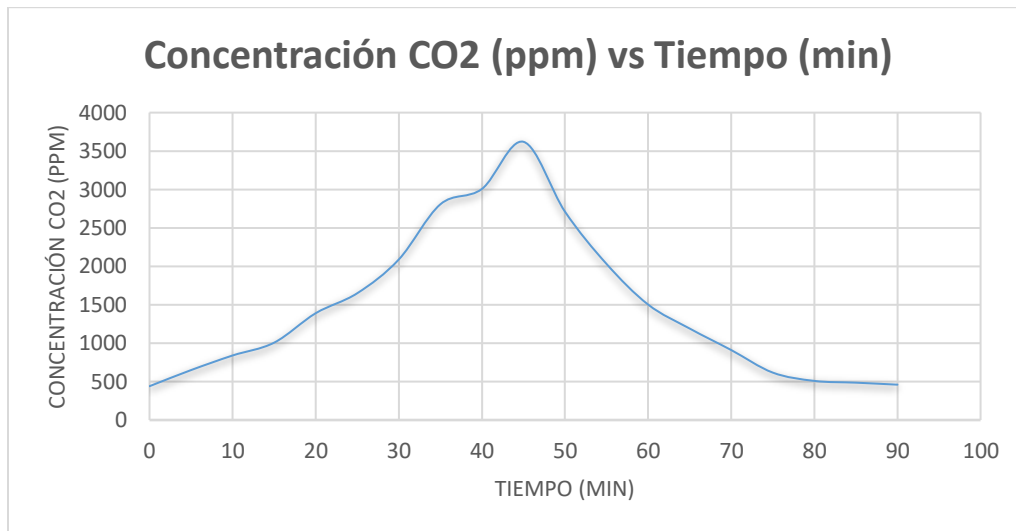
**Tabla 14.**

Tabla Eficiencia del sistema de adsorción de CO₂

Prueba	CO ₂ producido (g)	Masa inicial pellet (g)	Masa final pellet (g)	Adsorción CO ₂ (g)	Eficiencia de adsorción (%)	g de CO ₂ / Kg de pellet
1	23.090	-	-	-	-	-
2	16.610	320	321.250	1.250	7.526	3.906
3	20.220	225	227.076	2.076	10.267	9.226

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

4.9 Fabricación de material de construcción (Ladrillo)

Para la fabricación del ladrillo, se utilizó los pellets cargados de CO₂, junto con cemento y arena, teniendo en cuenta la siguiente composición:

Tabla 15.*Composición del ladrillo*

Ladrillo		
Pellet (%)	Cemento (%)	Arena (%)
80	10	10

Nota. Datos tomados durante las pruebas por los autores del proyecto.

Una vez teniendo la mezcla, se introdujo en moldes para llevarlo al horno de secado, el cual se mantuvo en un tiempo de dos (2) horas a una temperatura de quinientos (500) °C, para eliminar todo tipo de humedad presente en la mezcla.

Figura 17.*Ladrillo a base de pellets cargados de CO₂*

Nota. Fotografía tomada durante la fabricación del ladrillo

Figura 18.

Medidor de CO₂



Nota. Fotografía tomada durante la toma de datos.

5. Comparación del sistema realizado con otros métodos de adsorción

Se hizo la comparación de eficiencia del sistema construido con ciertos métodos de adsorción de CO₂ en diferentes procesos, tal como es la adsorción de CO₂ en corrientes de biogás a partir de huesos de cereza, y en el proceso de calcinación a partir de pellets a base biocarbón.

Tabla 16.*Comparación del sistema realizado*

Sistema de adsorción CO₂	Eficiencia (%)
Pellets (residuo minero + carbón activado)	Hasta un 10.27
Pellets (biocarbón)	Hasta 18.92
Huesos de cereza	Hasta 11.45

Nota. Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de Biogás, Tesis de grado Diego Fernando García Rico.

6. Conclusiones

Se realizó la caracterización de los relaves gravimétricos auríferos por medio del ensayo de EDS para determinar la capacidad adsorbente de CO₂, los resultados obtenidos muestran un alto contenido de Silicio (40,92 % p/p), acompañado de Carbono y Oxígeno, (10,85% p/p) y (45,29% p/p) respectivamente. Adicionalmente, utilizando un estereomicroscopio de la referencia Olympus SZ61 a una escala de 20X con el fin de analizar la superficie de los pellets fabricados, observando de esta manera la configuración, textura y porosidad del material adsorbente que para este caso son los pellets homogéneos.

Se construyó a escala de laboratorio un sistema de tipo columna que realizó la adsorción de CO₂ (producto de la clinkerización de la piedra caliza), que tiene como parte elemental una columna elaborado en vidrio pyrex, en donde es almacenado el material adsorbente, este posee una boquilla que tiene una dimensión de 2.6 cm de diámetro en su parte inferior, por la cual se da la entrada CO₂ al sistema, a su vez el vaso tiene una boquilla en la parte superior que tiene las

mismas dimensiones de diámetro que la inferior donde se da la salida del CO₂ residual en menor concentración que el dióxido de carbono de entrada, esto es debido a la acción que ejerce el material adsorbente almacenado en el sistema. Este vaso tiene una altura de 14 cm, un diámetro de 8 cm y una capacidad de almacenamiento total de 703,72 cm³. El sistema se construyó utilizando un reactor de acero galvanizado el cual se introdujo en el interior del horno tipo mufla con el fin de disminuir en la mayor medida posible las pérdidas de CO₂, este reactor se conectó a dos tuberías de cobre que se conectaron, una a un generador de aire, y la otra a la columna de vidrio con el material adsorbente. Para la medición del CO₂ se utilizó un equipo de medición de calidad del aire, el sistema estuvo conectado por medio de niples galvanizados, tuercas, teflón, entre otras piezas y se realizaron pruebas para verificar la buena conexión de todo el sistema minimizando así fugas en el mismo.

La concentración [ppm] de CO₂ fue calculada utilizando el medidor de alta precisión de calidad de aire que se basa en la detección de altas cantidades de CO₂. Los resultados de las pruebas evidenciaron que con pellets tipo 1 se alcanzó un porcentaje de captura del 7,526% lo cual equivale a 3.906 g CO₂/kg de pellets; y los resultados con los pellets tipo 2 fueron de 10,267% de porcentaje de captura, lo cual es equivalente a 9,226 g CO₂/kg de pellets, estos resultados fueron obtenidos a lo largo de un tiempo de 90 minutos.

Teniendo en cuenta los resultados se evidenció que los pellets tipo 2 tiene una capacidad de adsorción mayor (9,226 g CO₂/kg de pellets) en comparación a los pellets tipo 1, de estos resultados se puede concluir que los pellets con mayor cantidad de carbón activado tienen una mayor eficiencia para este tipo de procesos.

Finalmente, con la obtención de los pellets cargados de CO₂, se realizó el proceso de fabricación de material de construcción, arrojando en este un tipo de ladrillo con una fisionomía

muy inestable, y con propiedades poco adecuadas para uso industrial.], se sugiere mezclar con otros materias primas para mejorar su estabilidad mecánica.

7. Recomendaciones

Se recomienda realizar pruebas del sistema columna con relaves gravimétricos auríferos con otros tipos de emisiones tales como: gases de otros procesos industriales como es la industria del petróleo, del transporte o lo que es cualquier quema de combustible fósil.

Variar y evaluar la eficiencia del sistema de captura de CO₂, utilizando otros tipos de adsorbentes y así comparar resultados de los diferentes métodos.

Realizar pruebas piloto a gran escala en procesos industriales teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el laboratorio.

Modificar los porcentajes de materia prima del pellet, para una obtención exitosa de materiales de construcción en este caso el ladrillo, y así cerrar el ciclo de la economía circular.

Referencias Bibliográficas

- 360 en concreto. (s.f.). *¿Cuál es la composición química del cemento y cómo afecta sus propiedades?* <https://360enconcreto.com/blog/detalle/cual-es-la-composicion-quimica-del-cemento-y-como-afecta-sus-propiedades/>.
- Alvarez, N (2016) *Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de Biogas* Universidad de Oviedo, [Tesis doctoral para optar grado de doctor]
- Ambiente, D. M., & Plaza, M. G. (2009). *Desarrollo y modificación superficial de adsorbentes para la captura de CO₂ postcombustión tesis doctoral por*. Universidad de Oviedo departamento de ingeniería química y tecnología
- BBC News Mundo. (s.f.). *La enorme fuente de emisiones de CO₂ que está por todas partes y que quizás no conocías* <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Cortés Pizarro, R. J. (2013). *Aplicación de tecnología de captura y almacenamiento de CO₂ en centrales eléctricas a carbón en Chile*. <https://doi.org/10.7764/TEISISUC/ING/2878>
- García Rico, D. F. (2023) *Evaluación Preliminar de un sistema en columna con biocarbón para captura de dióxido de carbono* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]
- German, K., & Ávila, F. (n.d.). *Universidad del azuay facultad de ciencia y tecnología escuela de ingeniería en minas*.
- ICMM. (s.f) *Gestión de desechos, acerca de los relaves* <https://www.icmm.com/es/gestion-ambiental/gestion-de-desechos/acerca-de-los-relaves>
- Oficemen (s.f.) *Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación) actividades cubiertas según nomenclatura descripción de los procesos generadores de emisiones horno*

manipulación de materias primas obtención de materias primas combustibles.

www.oficemen.com

Valderrama, J. O., Campusano, R., Espindola, C., Valderrama, J. O., Campusano, R., & Espindola, C. (2019). Minería Chilena: Captura, Transporte, y Almacenamiento de Dióxido de Carbono en Relaves mediante Líquidos Iónicos y Carbonatación Mineral. *Información Tecnológica*, 30(5), 357–372. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500357>

Valladares-Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., de la Cruz Burelo, P., & Melgoza Alemán, R. M. (2018). Non-conventional absorbers: sustainable alternatives for wastewater treatment. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, 16(31), 55-73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>

Apéndices

Apéndice A. Cálculos matemáticos

Pellet tipo 1

$$\text{A) } 1.250 \text{ g de CO}_2 \rightarrow 320 \text{ g de pellets}$$

$$X \text{ g de CO}_2 \rightarrow 1000 \text{ g pellets (1kg)}$$

$$\mathbf{X = 3.906 \text{ g de CO}_2/\text{Kg de pellets}}$$

$$\text{B) } 16.610 \text{ g de CO}_2 \rightarrow 100\%$$

$$1.250 \text{ g de CO}_2 \rightarrow X \% \text{ de CO}_2$$

$$\mathbf{X = 7.526 \% \text{ de CO}_2}$$

Pellet tipo 2

$$\text{A) } 2.076 \text{ g de CO}_2 \rightarrow 225 \text{ g de pellets}$$

$$X \text{ g de CO}_2 \rightarrow 1000 \text{ g pellets (1kg)}$$

$$\mathbf{X = 9.226 \text{ g de CO}_2/\text{Kg de pellets}}$$

$$\text{B) } 20.220 \text{ g de CO}_2 \rightarrow 100\%$$

$$2.076 \text{ g de CO}_2 \rightarrow X \% \text{ de CO}_2$$

$$\mathbf{X = 10.267 \% \text{ de CO}_2}$$

Apéndice B. Fotografía del picnómetro



Apéndice C. Fotografía de las partes del sistema experimental

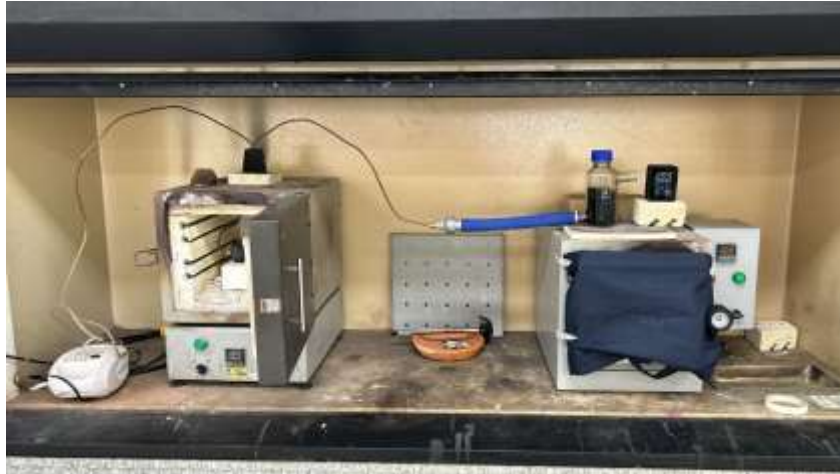




Apéndice D. Fotografía de pellets utilizados para el sistema experimental



Apéndice E. Sistema experimental para le medición de adsorción de CO₂



Apéndice F. Fotografía del reactor después del proceso de clinkerización



Apéndice G. Fotografía del postenfriamiento del reactor utilizado en el sistema experimental.

