

Evaluación preliminar de sistema de captura de CO₂ mediante pellets de biochart, de emisiones generadas por la coquización de carbones

Andrés Leonardo Almeida Mantilla y Deymer Damian Bedoya Sierra

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Walter Pardave Livia

MSc. Ingeniería Metalúrgica

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

PhD. Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Fundamentación Teórica.....	16
2.1 Carbones Coquizables.....	16
2.2 Ensayos de Caracterización de Carbones Coquizables.....	16
2.2.1 <i>Análisis Proximal</i>	16
2.2.1.1 Humedad.....	16
2.2.1.2 Materia Volátil.....	16
2.2.1.3 Cenizas.....	16
2.2.1.4 Carbono Fijo.	16
2.2.2 <i>Análisis Ultimate o Elemental</i>	16
2.2.3 <i>Índice de Hinchamiento Libre (FSI, por sus siglas en inglés)</i>	17
2.2.4 <i>Análisis Petrográfico</i>	17
2.2.5 <i>Ensayo de Plasticidad (Gieseler y Dilatometría)</i>	17
2.2.5.1 Gieseler.	17
2.2.5.2 Dilatometría.	17
2.3 Proceso de Coquización de Carbones	18

2.3.1 Fases del Proceso de Coquización y Producción de CO ₂	18
2.3.1.1 Fase de Secado (25-200 °C).....	18
2.3.1.2 Fase de Desvolatilización (200-500 °C).	18
2.3.1.2.1 Descomposición de oxigenados.	19
2.3.1.2.2 Craqueo térmico de compuestos orgánicos oxigenados.....	19
2.3.1.3 Fase de Reblandecimiento y Solidificación (450-550 °C).....	19
2.3.1.4 Fase de Coquización Final (> 550 °C).....	19
2.3.1.4.1 Reacción Boudouard.....	19
2.3.1.4.2 Oxidación parcial del carbono.	19
2.3.2 Parámetros Críticos y Producción de CO ₂	20
2.3.2.1 Temperatura.	20
2.3.2.2 Reactividad del carbón.....	20
2.3.2.3 Diseño del horno.	20
2.4 Producción de Gases y Problemas Asociados al CO ₂ en el Proceso de Coquización.....	20
2.4.1 Producción de Gases en la Coquización.	20
2.4.2 Impacto del CO ₂ en el Medio Ambiente.....	21
2.4.3 Problemas Asociados a la Producción de CO ₂	21
2.4.3.1 Cambio climático.....	21
2.4.3.2 Impacto regulatorio y económico.	21
2.4.3.3 Impacto social y reputacional.	22

2.5. Proceso de Adsorción.....	22
2.5.1 <i>Tipos Principales de Adsorción</i>	22
2.5.1.1 Fisisorción.....	22
2.5.1.2 Quimisorción.....	23
2.5.2 <i>Factores que afectan la eficiencia de la adsorción</i>	23
2.5.2.1 Área superficial específica del adsorbente.....	23
2.5.2.2 Porosidad del material.....	23
2.5.2.3 Condiciones del proceso.	23
2.6 Biochart como Solución para la Captura de CO ₂	23
2.6.1 <i>Propiedades del Biochart para la Captura de CO₂</i>	24
2.6.1.1 Alta porosidad y área superficial.	24
2.6.1.2 Estabilidad química.....	24
2.6.1.3 Flexibilidad en aplicaciones industriales.	24
2.6.2 <i>Mecanismo de Captura de CO₂</i>	24
2.6.3 <i>Aplicaciones en la Coquización</i>	24
3. Estado del Arte.....	24
3.1 Captura de CO ₂ en Procesos Industriales.....	25
3.2 Propiedades del Biochart para la Captura de CO ₂	25
3.3 Aplicación del Biochart en Sistemas de Lecho Fijo	26
3.4 Eficiencia en la Captura de CO ₂ y Desafíos	26

4. Metodología	27
4.1 Preparación de Materiales y Diseño Experimental.....	27
4.2 Montaje Experimental.....	29
4.3 Realización de Experimentos.....	32
5. Análisis de Datos y Evaluación de Resultados	33
5.1 Caracterización del Carbón Coquizable.....	33
5.2 Ficha Técnica del Biochart	34
5.3 Análisis y Cálculos de los Pellets de Biochart	35
5.4 Diseño de la Columna de Adsorción.....	37
5.5 Evaluación de la Eficiencia del Sistema de Adsorción de CO ₂	39
5.5.1 Configuración del Sistema Experimental	39
5.5.2 Concentraciones y Cálculos de Masa Producida y Capturada de CO ₂	40
5.5.2.1 Masa de CO ₂ Producido.....	41
5.5.2.2 Masa de CO ₂ Capturado.....	41
5.5.2.3 Eficiencia de Captura de CO ₂	41
5.5.3 Pruebas de Referencia (Pruebas 1 y 2)	43
5.5.4 Pruebas con la Columna de Biochart (Pruebas 3 a 6)	43
5.5.4.1 Pruebas a 450 °C (Pruebas 3 y 4).	43
5.5.4.2 Pruebas a 600 °C (Pruebas 5 y 6).	44
5.5.5 Comparación General	44

5.5.5.1 Efecto de la Temperatura.	44
5.5.5.2 Efecto de la Altura del Lecho.....	44
5.5.5.3 Rendimiento del Sistema.	44
6. Conclusiones.....	45
7. Recomendaciones.....	46
Referencias Bibliográficas.....	48
Apéndices.....	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados de la Caracterización.....	33
Tabla 2. Propiedades Físico-Químicas y Composición del Biochart (Carbón Vegetal).....	34
Tabla 3. Análisis pellets de Biochart Obtenidos.....	36
Tabla 4. Características de diseño de la columna de adsorción a escala laboratorio.	37
Tabla 5. Configuraciones de las pruebas experimentales.....	40
Tabla 6. Concentraciones y Masa de CO ₂ producido y capturado	42

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama del Proceso Metodológico General.....	27
Figura 2. Muestra Inicial de Carbón Coquizable	28
Figura 3. Diagrama preparación y obtención de pellets de biochart	29
Figura 4. Reactor de acero al carbón y muestra inicial de carbón coquizable.....	30
Figura 5. Configuración columna de adsorción y medidor de CO ₂	31
Figura 6. Bomba de aire (Air Pump AP 1668).....	31
Figura 7. Horno Tipo Mufla.....	32
Figura 8. Pellets de biochart producidos y fotografía de superficie porosa bajo estereomicroscopio	36
Figura 9. Columna de adsorción utilizada en la fase experimental	38

Lista de Apéndices

Apéndice A. Definiciones, ecuaciones y procedimientos utilizados para la caracterización del carbón.....	51
Apéndice B. Ficha Técnica: Carbón Vegetal.....	55
Apéndice C. Cálculo propiedades físicas de los pellets.....	57
Apéndice D. Fotografías de equipos empleados y montaje.	59
Apéndice E. Datos Experimentales.....	61

Glosario

Adsorción: Proceso mediante el cual átomos, iones o moléculas de un gas, líquido o solución se adhieren a la superficie de un sólido.

Biochart: Material carbonoso producido mediante pirolisis de biomasa, caracterizado por su alta porosidad y capacidad de adsorción.

Captura de CO₂: Proceso tecnológico para separar y almacenar dióxido de carbono de las emisiones industriales con el fin de mitigar el cambio climático.

Coquizables (Carbones): Carbones que pueden someterse al proceso de coquización para producir coque metalúrgico.

Coquización: Proceso de calentamiento del carbón en ausencia de oxígeno para producir coque metalúrgico, liberando emisiones gaseosas.

Dióxido de Carbono (CO₂): Gas de efecto invernadero producido por actividades humanas e industriales, como la combustión y la coquización.

Lecho Fijo: Disposición de un material sólido en una columna donde el fluido atraviesa el lecho sin modificar su estructura.

Pellets: Pequeñas partículas o gránulos compactados de material, como el biochart, utilizados en procesos industriales.

Pirolisis: Descomposición térmica de materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando productos sólidos, líquidos y gaseosos.

Porosidad: Propiedad de un material sólido que describe la cantidad de espacios vacíos en su estructura, influye en su capacidad de adsorción.

Sistema de Captura de CO₂: Conjunto de tecnologías o dispositivos diseñados para retener y almacenar el dióxido de carbono de las emisiones.

Resumen

Título: Evaluación preliminar de sistema de captura de CO₂ mediante pellets de biochart, de emisiones generadas por la coquización de carbones *

Autor: Andrés Leonardo Almeida Mantilla y Deymer Damian Bedoya Sierra **

Palabras Clave: Adsorción, biochart, pellets, coquización, porosidad, lecho fijo, captura de CO₂.

Descripción: El aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generado por procesos industriales como la coquización de carbones representa un desafío ambiental significativo. Este proyecto busca evaluar la eficiencia de un sistema de captura de CO₂ basado en pellets de biochart, un material carbonoso derivado de la pirólisis de biomasa, reconocido por su alta porosidad y capacidad de adsorción.

Para ello, se diseñó un montaje experimental que incluye un reactor de acero al carbón, un sistema de tuberías de cobre, una columna de lecho fijo de biochart y un medidor de calidad de aire para registrar las concentraciones de CO₂. Se llevaron a cabo pruebas controladas variando condiciones de operación clave, como la temperatura de coquización (450 °C y 600 °C) y la configuración del lecho fijo en la columna, evaluando alturas de 5 cm y 10 cm.

Los resultados mostraron que la eficiencia de captura de CO₂ alcanzó un máximo del **55,65 %** en condiciones de 450 °C y una altura de lecho de 10 cm, mientras que a 600 °C se observó una disminución en la eficiencia debido a la mayor producción de CO₂ y la posible saturación del material adsorbente. Estas pruebas destacaron la influencia significativa de las variables operativas en el rendimiento del sistema.

Este estudio sienta las bases para la optimización de tecnologías de captura de carbono aplicables en procesos industriales, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles que mitiguen el impacto ambiental del cambio climático.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería Química. Director: Walter Pardavé Livia, MSc. Ingeniería Metalúrgica. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita, PhD. Ciencia y Tecnología de Materiales.

Abstract

Title: Preliminary Evaluation of a CO₂ Capture System Using Biochar Pellets from Emissions Generated by Coal Coking*

Authors: Andrés Leonardo Almeida Mantilla and Deymer Damian Bedoya Sierra

Keywords: Adsorption, biochar, pellets, coking, porosity, fixed bed, CO₂ capture.

Description: The increase in carbon dioxide (CO₂) emissions generated by industrial processes such as coal coking represents a significant environmental challenge. This project aims to evaluate the efficiency of a CO₂ capture system based on biochar pellets, a carbonaceous material derived from biomass pyrolysis, known for its high porosity and adsorption capacity.

To achieve this, an experimental setup was designed, including a carbon steel reactor, a copper piping system, a fixed-bed biochar column, and an air quality monitor to record CO₂ concentrations. Controlled tests were conducted by varying key operating conditions, such as the coking temperature (450 °C and 600 °C) and the fixed-bed configuration, with bed heights of 5 cm and 10 cm.

The results showed that the CO₂ capture efficiency reached a maximum of 55.65% under conditions of 450 °C and a 10 cm bed height, while at 600 °C, a reduction in efficiency was observed due to increased CO₂ production and possible saturation of the adsorbent material. These tests highlighted the significant influence of operating variables on system performance.

This study lays the groundwork for optimizing carbon capture technologies applicable to industrial processes, contributing to the development of sustainable solutions that mitigate the environmental impact of climate change.

Bachelor Thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering. Advisor: Walter Pardavé Livia, MSc. Metallurgical Engineering. Co-advisor: Pedro Luis Delvasto Angarita, PhD. Materials Science and Technology.

Introducción

El cambio climático es un problema urgente, impulsado en gran parte por las emisiones industriales de CO₂. En particular, la coquización de carbones, esencial para la industria siderúrgica, contribuye significativamente a la liberación de este gas. Si no se aplican estrategias de mitigación, se prevé un aumento del 130% en estas emisiones para 2050 (Ecología Verde, 2019.). Este escenario resalta la urgencia de desarrollar tecnologías que reduzcan las emisiones de CO₂ en procesos industriales.

En la búsqueda de soluciones sostenibles, el biochart, un material poroso obtenido de la pirolisis de biomasa ha demostrado un gran potencial para capturar CO₂ (Garzón Green Energy, n.d.). Su aplicación en sistemas de lecho fijo ha sido estudiada en diversas industrias, pero su efectividad en la coquización de carbones aun requiere evaluación detallada (Industria Química, 2024). Sin embargo, la eficacia del biochart en la captura de CO₂ específicamente en emisiones generadas por la coquización de carbones aún requiere una evaluación detallada.

Este proyecto busca analizar la eficiencia de captura de CO₂ con pellets de biochart en un lecho fijo, optimizando las condiciones de operación para reducir las emisiones en la industria siderúrgica.

Para abordar el problema planteado, se diseñó un estudio experimental que involucra variables como la temperatura de coquización y la altura del lecho de pellets de biochart, con el fin de identificar las condiciones óptimas para la captura de CO₂. Este enfoque experimental permite obtener datos empíricos que respaldan la viabilidad del uso de biochart en aplicaciones industriales para la mitigación de emisiones de CO₂.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia de captura de CO₂ mediante el uso de pellets de biochart en un sistema de lecho fijo, aplicado a las emisiones generadas durante la coquización de carbones.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar físico-químicamente el carbón coquizable utilizado como materia prima en el proceso de coquización y los pellets de biochart obtenidos, evaluando propiedades relevantes para su desempeño en la generación y captura de CO₂.

Diseñar y construir un sistema experimental de lecho fijo con pellets de biochart para la captura de CO₂ de las emisiones generadas durante la coquización de carbones.

Determinar la eficiencia de captura de CO₂ con pellets de biochart para las emisiones de coquización, empleando un medidor electrónico de calidad de aire para registrar la concentración de CO₂ a la salida del sistema.

2. Fundamentación Teórica

2.1 Carbones Coquizables

Los carbones coquizables son un tipo de carbón bituminoso que, al calentarse sin oxígeno, se convierten en coque metalúrgico. Este material, clave en la siderurgia, destaca por su resistencia, estabilidad térmica y función como agente reductor en altos hornos. Para evaluar su calidad, se realizan análisis físicos, químicos y petrográficos en laboratorio.

2.2 Ensayos de Caracterización de Carbones Coquizables

2.2.1 *Análisis Proximal*

Este ensayo determina las fracciones principales del carbón, incluyendo:

2.2.1.1 Humedad. Contenido de agua presente en el carbón, evaluado mediante el secado de una muestra a 105 °C. Una baja humedad mejora la eficiencia del proceso de coquización.

2.2.1.2 Materia Volátil. Cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos que se liberan al calentar el carbón a temperaturas controladas. Un contenido adecuado de materia volátil favorece la plasticidad del carbón.

2.2.1.3 Cenizas. Residuos minerales no combustibles que quedan después de quemar el carbón. Un contenido elevado de cenizas puede afectar la calidad del coque.

2.2.1.4 Carbono Fijo. Proporción de carbono que no forma parte de las materias volátiles ni de las cenizas. Este parámetro es fundamental para la producción de coque.

2.2.2 *Análisis Ultimate o Elemental*

Este ensayo cuantifica los elementos principales presentes en el carbón: carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O). La proporción de estos elementos influye directamente en la reactividad y el poder calorífico del carbón (Speight, 2013).

2.2.3 Índice de Hinchamiento Libre (FSI, por sus siglas en inglés)

Evalúa la capacidad del carbón para expandirse o hincharse durante el calentamiento. Un índice de hinchamiento adecuado indica que el carbón puede formar una masa cohesiva, esencial para producir coque de alta calidad (Ricketts, 2013).

2.2.4 Análisis Petrográfico

Utiliza microscopía óptica para observar las macerales (componentes orgánicos del carbón) y determinar su composición y grado de metamorfismo. Los macerales más relevantes para la coquización son la vitrinita, liptinita e inertinita. La vitrinita, en particular, es clave para una buena plasticidad del carbón.

2.2.5 Ensayo de Plasticidad (Gieseler y Dilatometría)

2.2.5.1 Gieseler. Mide la fluidez del carbón durante su ablandamiento y solidificación en función de la temperatura. Este ensayo es fundamental para determinar la temperatura óptima de coquización.

2.2.5.2 Dilatometría. Mide el cambio en el volumen del carbón al ser calentado. Los carbones con buena plasticidad muestran un rango dilatométrico adecuado.

2.2.6 Índice de Reactividad del Coque (CRI) y Resistencia del Coque después de la Reacción (CSR)

Aunque estos ensayos se realizan al coque, son esenciales para evaluar el desempeño del carbón coquizable en términos de resistencia y estabilidad química frente a reacciones con gases como el CO₂ (Nomura et al., 2004).

La caracterización detallada de los carbones coquizables permite seleccionar las mezclas adecuadas para garantizar un coque de alta calidad, minimizar las emisiones contaminantes y optimizar el rendimiento del proceso. Estas evaluaciones también ayudan a identificar posibles ajustes en las condiciones operativas para reducir costos y mejorar la sostenibilidad de la producción siderúrgica.

2.3 Proceso de Coquización de Carbones

La coquización de carbones es un proceso térmico que transforma el carbón coquizable en coque metalúrgico. Este proceso ocurre en hornos cerrados en ausencia de oxígeno y se caracteriza por una serie de etapas térmicas y reacciones químicas que definen la calidad del coque. Durante el proceso, el dióxido de carbono (CO₂) se genera en varias etapas críticas debido a la descomposición de compuestos carbonosos y reacciones específicas (Ricketts, 2013; Speight, 2013).

2.3.1 Fases del Proceso de Coquización y Producción de CO₂

2.3.1.1 Fase de Secado (25-200 °C). En esta etapa inicial, el carbón pierde su humedad mediante evaporación. No se generan emisiones de CO₂ significativas, ya que no ocurren reacciones químicas de oxidación o descomposición.

2.3.1.2 Fase de Desvolatilización (200-500 °C). En esta etapa comienza la liberación de compuestos volátiles, incluyendo hidrocarburos, gases ligeros y oxigenados como CO y CO₂.

2.3.1.2.1 Descomposición de oxigenados. $R-OH \rightarrow R-H + CO + CO_2$. Aquí, los grupos hidroxilo (-OH-OH-OH) presentes en el carbón se descomponen, liberando pequeñas cantidades de CO₂ junto con monóxido de carbono.

2.3.1.2.2 Craqueo térmico de compuestos orgánicos oxigenados. $R-COOH \rightarrow R-H + CO_2$ Los compuestos carboxílicos generan CO₂ en este rango de temperaturas.

La mayoría de las emisiones iniciales de CO₂ ocurren en este rango debido a la volatilización de compuestos oxigenados.

2.3.1.3 Fase de Reblandecimiento y Solidificación (450-550 °C). Durante esta etapa, el carbón se ablanda, alcanza su plasticidad y comienza a solidificarse. Aunque la producción de CO₂ disminuye, las pequeñas cantidades remanentes de compuestos oxigenados aún pueden generar este gas. (Reorganización molecular y eliminación de oxígeno residual.)

2.3.1.4 Fase de Coquización Final (> 550 °C). Esta fase comprende la eliminación total de compuestos volátiles y la carbonización completa del material. A altas temperaturas, ocurren reacciones secundarias que involucran la generación de CO₂.

2.3.1.4.1 Reacción Boudouard. ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$). Aunque esta reacción consume CO₂, puede estar en equilibrio, generando pequeñas cantidades de este gas dependiendo de las condiciones del proceso.

2.3.1.4.2 Oxidación parcial del carbono. ($C + O_2 \rightarrow CO_2$) Si hay trazas de oxígeno en el horno, el carbono sólido puede oxidarse para formar CO₂. A partir de 600 °C, las emisiones de CO₂ se estabilizan y disminuyen progresivamente.

2.3.2 Parámetros Críticos y Producción de CO₂.

2.3.2.1 Temperatura. La producción de CO₂ se concentra principalmente en el rango de 200-500 °C, durante la desvolatilización y el inicio de la solidificación del coque.

2.3.2.2 Reactividad del carbón. La cantidad de compuestos oxigenados en el carbón coquizable determina el volumen de CO₂ emitido.

2.3.2.3 Diseño del horno. Hornos herméticos minimizan la oxidación secundaria que produce CO₂ adicional.

El control de las emisiones de CO₂ en el proceso de coquización es fundamental para mitigar su impacto ambiental. La implementación de tecnologías como la captura de carbono y el reciclaje de gases puede reducir significativamente estas emisiones (Nomura et al., 2004; Metz et al., 2005).

2.4 Producción de Gases y Problemas Asociados al CO₂ en el Proceso de Coquización

El proceso de coquización genera una variedad de gases durante las diferentes fases térmicas, entre los que destacan el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄) y otros hidrocarburos volátiles. Estos gases, conocidos colectivamente como "gas de horno de coque", son el resultado de la descomposición térmica y la volatilización de compuestos orgánicos y oxigenados presentes en el carbón (Ricketts, 2013).

2.4.1 Producción de Gases en la Coquización.

La producción de gases ocurre principalmente en la fase de desvolatilización (200-500 °C), donde se libera la mayor cantidad de compuestos volátiles. Durante este rango, el CO₂ se genera a través de la descomposición de grupos carboxílicos (-COOH) y alcoholes (-OH) presentes en la estructura del carbón. A partir de los 550 °C, la producción de CO₂ disminuye, pero aún pueden

generarse pequeñas cantidades debido a reacciones secundarias a altas temperaturas, como la reacción Boudouard y la oxidación parcial del carbono (Speight, 2013).

Reacciones clave en la producción de CO₂:

- $R-COOH \rightarrow R-H + CO_2$
- $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ (reacción Boudouard)
- $C + O_2 \rightarrow CO_2$

2.4.2 Impacto del CO₂ en el Medio Ambiente

El CO₂ generado durante la coquización representa una fuente significativa de emisiones industriales. En promedio, se producen entre 300 y 500 kg de CO₂ por tonelada de carbón coquizado, lo que convierte a este proceso en un contribuyente importante al cambio climático (Nomura et al., 2004). Estas emisiones no solo incrementan la concentración de CO₂ en la atmósfera, exacerbando el efecto invernadero, sino que también representan un desafío para la industria siderúrgica, que enfrenta presiones regulatorias para reducir su huella de carbono (Metz et al., 2005).

2.4.3 Problemas Asociados a la Producción de CO₂

2.4.3.1 Cambio climático. El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero, y su acumulación en la atmósfera está vinculada al aumento de la temperatura global, fenómenos meteorológicos extremos y el deshielo de los polos (IPCC, 2014).

2.4.3.2 Impacto regulatorio y económico. La industria siderúrgica enfrenta regulaciones cada vez más estrictas para reducir sus emisiones de CO₂, lo que puede aumentar los costos de

producción debido a la necesidad de implementar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (Metz et al., 2005).

2.4.3.3 Impacto social y reputacional. Las comunidades cercanas a plantas siderúrgicas pueden experimentar efectos negativos en la calidad del aire, mientras que las empresas que no adoptan medidas sostenibles pueden perder competitividad en mercados internacionales.

A pesar de los problemas asociados, el gas de horno de coque tiene un valor económico significativo si se captura y procesa adecuadamente. Fracciones de este gas, como el hidrógeno y el monóxido de carbono, pueden ser utilizadas como combustibles o insumos químicos, mientras que el CO₂ puede ser capturado para reducir las emisiones netas.

2.5. Proceso de Adsorción

La adsorción es un fenómeno físico-químico mediante el cual moléculas de un gas, líquido o soluto se adhieren a la superficie de un sólido, conocido como adsorbente. Este proceso ocurre debido a las fuerzas intermoleculares presentes en la superficie del adsorbente, como las interacciones de Van der Waals o la formación de enlaces químicos débiles. Es ampliamente utilizado en aplicaciones ambientales, como la captura de dióxido de carbono (CO₂), purificación de gases y tratamiento de aguas residuales (Rouquerol et al., 2013).

2.5.1 Tipos Principales de Adsorción

Existen dos tipos principales de adsorción: **física (fisorción)** y **química (quimisorción)**:

2.5.1.1 Fisorción. Es un proceso reversible en el que las moléculas adsorbidas se mantienen en la superficie del adsorbente mediante fuerzas de Van der Waals. Es más prominente a bajas temperaturas y no implica la formación de enlaces químicos.

2.5.1.2 Quimisorción. Involucra la formación de enlaces químicos entre las moléculas adsorbidas y la superficie del adsorbente. Este proceso es generalmente irreversible y ocurre a temperaturas más altas (Sing et al., 2001).

2.5.2 Factores que afectan la eficiencia de la adsorción

La eficiencia de la adsorción depende de varios factores, como:

2.5.2.1 Área superficial específica del adsorbente. Un área mayor proporciona más sitios disponibles para la adsorción.

2.5.2.2 Porosidad del material. Materiales con alta porosidad, como el biochart, son ideales para adsorber moléculas de CO₂, ya que sus microporos ofrecen una gran superficie interna.

2.5.2.3 Condiciones del proceso. La temperatura, presión y concentración del adsorbato afectan la cantidad de moléculas adsorbidas.

En el contexto de la captura de CO₂, materiales como el biochart destacan por su estructura porosa y la presencia de grupos funcionales en su superficie, que facilitan la adsorción física y química del gas. Según Lehmann y Joseph (2009), el biochart obtenido mediante pirólisis de biomasa es altamente eficiente para adsorber CO₂ debido a su área superficial específica elevada y su afinidad con este gas.

2.6 Biochart como Solución para la Captura de CO₂

El biochart ha emergido como una solución prometedora para mitigar los problemas asociados a la producción de CO₂ en procesos industriales como la coquización. Este material, derivado de la pirólisis de biomasa, posee propiedades únicas que lo hacen ideal para la captura de CO₂, especialmente en sistemas de lecho fijo.

2.6.1 Propiedades del Biochart para la Captura de CO₂

2.6.1.1 Alta porosidad y área superficial. Estas características maximizan la interacción entre el biochart y las moléculas de CO₂, aumentando la eficiencia de captura (Lehmann & Joseph, 2009).

2.6.1.2 Estabilidad química. El biochart puede almacenar carbono durante largos períodos sin degradarse, lo que contribuye a la reducción neta de emisiones de CO₂.

2.6.1.3 Flexibilidad en aplicaciones industriales. Puede ser utilizado en diversas configuraciones, como columnas de lecho fijo, donde se optimiza el contacto gas-sólido.

2.6.2 Mecanismo de Captura de CO₂

El biochart captura CO₂ principalmente a través de adsorción física, donde las moléculas de CO₂ se adhieren a la superficie del material por interacciones van der Waals. Adicionalmente, en algunos casos, puede ocurrir adsorción química, donde el CO₂ reacciona con grupos funcionales en la superficie del biochart, formando compuestos estables (Yang, 1987).

2.6.3 Aplicaciones en la Coquización

La integración del biochart en procesos como la coquización permite capturar parte del CO₂ generado, reduciendo significativamente las emisiones. Además, su uso fomenta una economía circular, ya que puede producirse a partir de residuos orgánicos y reutilizarse después de su ciclo de captura (Lehmann & Joseph, 2009).

3. Estado del Arte

La creciente preocupación por el cambio climático ha catalizado el desarrollo de tecnologías innovadoras para mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes de

procesos industriales. En particular, la coquización de carbones, utilizada para producir coque metalúrgico en la industria siderúrgica, es una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ (Ibitoye et al., 2024). Ante esta problemática, el biochart ha emergido como un material prometedor debido a su capacidad de adsorción de CO₂ y su potencial para ser producido de manera sostenible mediante la pirólisis de biomasa (Lehmann & Joseph, 2009).

3.1 Captura de CO₂ en Procesos Industriales

La captura de CO₂ en fuentes estacionarias, como los procesos de coquización, ha sido objeto de investigaciones que buscan desarrollar sistemas eficientes y sostenibles. Entre las estrategias existentes, la adsorción física y química utilizando materiales porosos como el biochart ha demostrado ser efectiva. Estudios recientes han explorado la capacidad del biochart para adsorber CO₂, destacando su alta porosidad y su capacidad para almacenar carbono durante largos períodos (An Overview of Biochar Production Techniques and Application in Iron and Steel Industries, 2024).

3.2 Propiedades del Biochart para la Captura de CO₂

El biochart se caracteriza por su alta área superficial, estructura porosa y estabilidad química, lo que lo convierte en un excelente adsorbente de CO₂. Investigaciones recientes han optimizado estas propiedades mediante tratamientos de activación química, como el uso de KOH, que incrementan significativamente su capacidad de adsorción (Biochar Today, 2024). Además, se ha encontrado que el tamaño de los microporos y la presencia de grupos funcionales en la superficie del biochart son determinantes clave para mejorar su rendimiento (Riahi & LaDouceur, 2024).

3.3 Aplicación del Biochart en Sistemas de Lecho Fijo

La integración del biochart en sistemas de lecho fijo ha sido propuesta como una estrategia viable para la captura de CO₂ en emisiones industriales. Estos sistemas permiten maximizar el contacto entre el gas y el material adsorbente, logrando una mayor eficiencia de captura. En el contexto de la coquización de carbones, la implementación de biochart en lechos fijos ha mostrado resultados prometedores en términos de reducción de emisiones y mejora de la calidad del gas tratado (Ibitoye et al., 2024).

3.4 Eficiencia en la Captura de CO₂ y Desafíos

Aunque el biochart ofrece múltiples ventajas, su aplicación a gran escala enfrenta varios desafíos. Por un lado, la variabilidad en las propiedades del biochart según la biomasa utilizada y las condiciones de pirólisis puede influir en su capacidad de adsorción. Por otro lado, la integración de este material en procesos industriales como la coquización requiere un diseño experimental cuidadoso para identificar las condiciones óptimas de operación, incluyendo la temperatura y la altura del lecho fijo (Tata Steel Becomes the First Indian Steel Maker to Introduce Biochar to Lower Carbon Emissions, 2024).

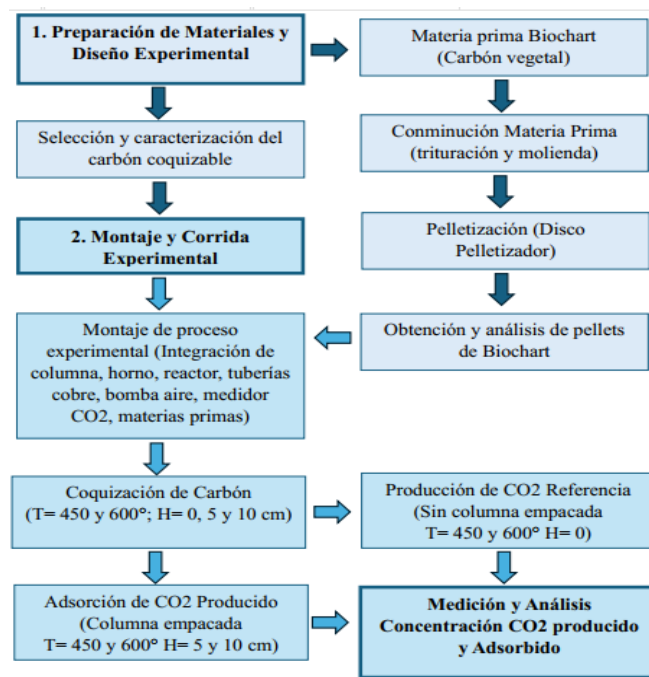
Para concluir, el biochart ha demostrado ser un material versátil y eficaz para la captura de CO₂, con aplicaciones que abarcan desde la mejora de suelos hasta la mitigación de emisiones industriales. Sin embargo, su implementación en procesos específicos como la coquización de carbones requiere una evaluación detallada para garantizar su eficacia y viabilidad económica. Las investigaciones actuales ofrecen una base sólida para su desarrollo, destacando la importancia de continuar explorando su potencial en condiciones específicas de operación.

4. Metodología

El desarrollo del proyecto se llevó a cabo siguiendo una metodología estructurada, que comprendió diferentes fases diseñadas para alcanzar los objetivos planteados. Estas fases incluyeron la preparación de materiales, el montaje experimental, la realización de pruebas experimentales y el análisis de los datos obtenidos. En la **Figura 1** se describe el proceso metodológico general en forma de diagrama.

Figura 1.

Diagrama del Proceso Metodológico General



4.1 Preparación de Materiales y Diseño Experimental

La primera fase del proyecto se centró en la selección y caracterización del carbón coquizable, una materia prima esencial en el proceso de coquización. En la **Figura 2** se muestra el carbón seleccionado, el cual fue sometido a un proceso de conminución que incluyó la trituración inicial en un triturador de mandíbula, seguida de una molienda en un molino de bolas. Este

tratamiento permitió obtener muestras adecuadas para realizar un análisis físico-químicos detallados, a fin de evaluar propiedades clave como el contenido de humedad, cenizas, materia volátil, poder calorífico y carbono fijo.

Figura 2.

Muestra Inicial de Carbón Coquizable



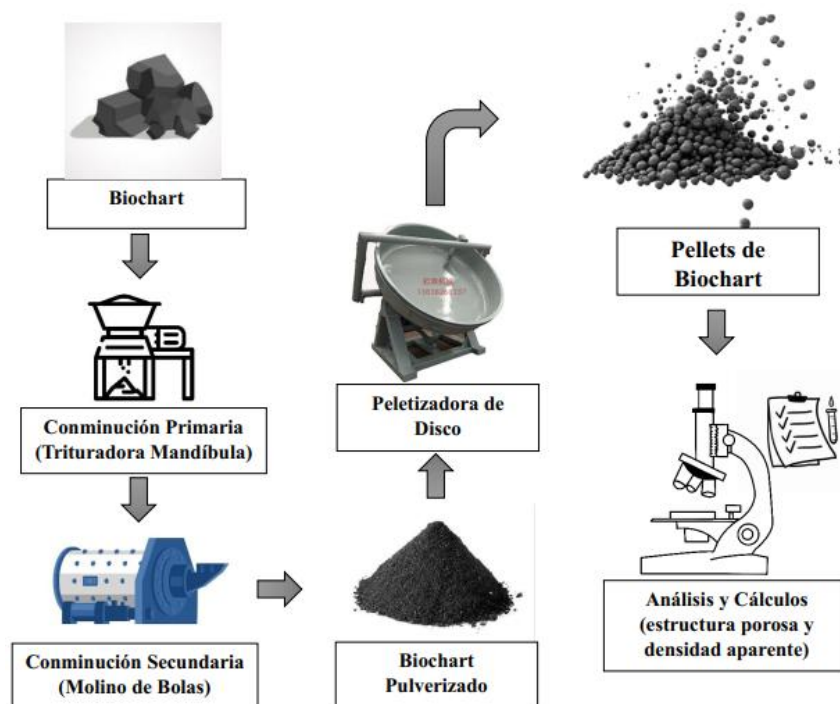
De manera paralela, se produjeron los pellets de biochart utilizados en el sistema experimental. Este material se obtuvo por medio de un proveedor industrial (Bioespacio Orgánicos y Minerales), el cual nos proporcionó la ficha técnica con la información relevante de la materia prima. Posteriormente, esta fue triturada en una trituradora de mandíbula para disminuir su tamaño, pulverizada en un molino de bolas y tamizada (Tamiz 8" Malla N°100 (150 micras) para garantizar una distribución uniforme del tamaño de partículas.

Finalmente, el material pulverizado fue aglomerado en una peletizadora de disco utilizando agua como aglutinante, lo que permitió obtener pellets uniformes y con propiedades mecánicas adecuadas para su uso en el sistema de lecho fijo. Además, se llevó a cabo un análisis utilizando microscopía óptica mediante un Estereomicroscopio Olympus SZ61 para determinar la **estructura**

porosa y se calculó su **densidad aparente**, aspectos clave para evaluar su desempeño en la adsorción de CO₂. La **Figura 3** presenta un diagrama esquemático que ilustra detalladamente este proceso, permitiendo una visualización clara y organizada de las etapas involucradas.

Figura 3.

Diagrama preparación y obtención de pellets de biochart



En esta fase también se definió el diseño experimental, el cual incluyó dos variables principales: la temperatura de coquización (450 °C y 600 °C) y la altura del lecho fijo en la columna de biochart (5 cm y 10 cm). Estas condiciones se seleccionaron con el objetivo de evaluar su influencia en la eficiencia de captura de CO₂.

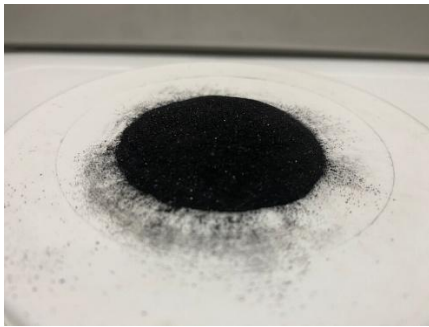
4.2 Montaje Experimental

El montaje experimental se diseñó para simular un proceso de coquización en condiciones controladas, permitiendo medir y analizar las emisiones de CO₂ en tiempo real. El sistema incluyó

un reactor de acero al carbón, resistente a altas temperaturas, en el cual se llevó a cabo la coquización del carbón coquizable (*Ver Figura 4*). Este reactor se conectó herméticamente a un sistema de tuberías de cobre, asegurando la conducción de los gases generados hacia una columna de lecho fijo.

Figura 4.

Reactor de acero al carbón y muestra inicial de carbón coquizable



La columna de lecho fijo, fabricada en material Pyrex para soportar condiciones térmicas y químicas exigentes, se llenó con pellets de biochart. Su diseño permitió la configuración de dos alturas de lecho fijo (5 cm y 10 cm), facilitando el estudio de esta variable en el proceso. En la salida superior de la columna se instaló un medidor electrónico de calidad de aire, con un rango de detección de 0 a 5000 ppm, para registrar la concentración de CO₂ en los gases tratados (*Ver*

Figura 5).

Figura 5.

Configuración columna de adsorción y medidor de CO₂



El montaje se complementó con un sistema de flujo de aire controlado mediante una bomba de aire (*Ver Figura 6*), que garantizó una alimentación constante de 1,6 L/min de aire al reactor durante las pruebas.

Figura 6.

Bomba de aire (Air Pump AP 1668)



Además, se utilizó un horno tipo mufla capaz de alcanzar temperaturas de hasta 1100 °C para calentar el reactor a las temperaturas seleccionadas en el diseño experimental (*Ver Figura 7*).

Figura 7.

Horno Tipo Mufla



4.3 Realización de Experimentos

La etapa experimental se dividió en dos series principales de pruebas: pruebas de referencia y pruebas con la columna de biochart. Las pruebas de referencia consistieron en la coquización del carbón sin el uso de la columna, con el fin de determinar la cantidad base de CO₂ generada en el proceso a las dos temperaturas seleccionadas (450 °C y 600 °C). Durante estas pruebas, se tomaron mediciones de la concentración de CO₂ cada 5 minutos durante 90 minutos, utilizando el medidor de calidad de aire instalado en el sistema.

Posteriormente, se realizaron las pruebas con la columna de biochart, configurando las dos alturas de lecho fijo (5 cm y 10 cm) en la columna. En estas pruebas, los gases generados durante la coquización fueron dirigidos hacia la columna de biochart, donde se evaluó la capacidad de los

pellets para adsorber el CO₂ presente en las emisiones. Las mediciones se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones de tiempo que en las pruebas de referencia, permitiendo una comparación directa entre ambos conjuntos de datos.

5. Análisis de Datos y Evaluación de Resultados

El análisis de datos se estructuró en diferentes etapas para evaluar de manera integral el desempeño del sistema de captura de CO₂ mediante pellets de biochart. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada etapa, desde la caracterización de las materias primas hasta el análisis de la eficiencia de adsorción.

5.1 Caracterización del Carbón Coquizable

La caracterización físico-química del carbón coquizable se realizó para evaluar las propiedades esenciales que afectan su comportamiento en el proceso de coquización. Los resultados de los análisis presentes en la **Tabla 1**. Aquí, se incluyeron factores como la humedad determinada mediante secado en estufa a 100 °C durante una hora. Las cenizas se cuantificadas mediante calcinación en horno a 750 °C. La materia volátil evaluado mediante calentamiento en atmósfera inerte. El poder calorífico calculado utilizando una cámara calorimétrica, mientras que el carbono fijo se determinó por diferencia, basándose en los valores obtenidos en las mediciones anteriores.

Tabla 1.

Resultados de la Caracterización

Propiedad	Valor
Humedad [%]	1,84
Cenizas [%]	22,46

Materia Volátil [%]	0,49
Carbono Fijo [%]	75,21
Poder Calorífico [BTU/Lb]	13174,49

Nota. En el

Apéndice A. se encuentra la definición y descripción de las ecuaciones utilizadas para calcular cada uno de estos parámetros.

Los resultados de la caracterización indican que este carbón coquizable tiene fortalezas importantes, como su bajo contenido de humedad, alto carbono fijo y buen poder calorífico, que lo hacen adecuado para procesos de coquización. Sin embargo, el alto contenido de cenizas podría ser un desafío, ya que afecta tanto la calidad del coque como el manejo de subproductos del proceso. Desde un punto de vista práctico, el carbón caracterizado es adecuado para el desarrollo experimental, aunque su alto contenido de cenizas puede influir en los resultados del proceso. Por otro lado, su bajo contenido de materia volátil sugiere que no contribuirá significativamente a la formación de gases secundarios, como metano o CO₂, durante la coquización, lo que debe tomarse en cuenta al evaluar la eficiencia del carbón como materia prima de este proceso.

5.2 Ficha Técnica del Biochart

El biochart empleado en este proyecto fue proporcionado por Bioespacio Orgánicos y Minerales, y su ficha técnica (*Ver Apéndice B.*) incluyó los siguientes parámetros relevantes:

Tabla 2.

Propiedades Físico-Químicas y Composición del Biochart (Carbón Vegetal)

Propiedades Físico-Químicas	Composición
-----------------------------	-------------

Olor	Humo Residual	Carbono	87,90%
Granulometría	15-100 mm	Hidrógeno	2,83%
Densidad	1500 kg/m ³	Nitrógeno	0,31%
Cenizas	1,00 - 3,50 %	Azufre	<0,13%
Materia Volátil	11 - 25 %	Oxígeno	7,69%

Nota. Adaptado de Bioespacio Orgánicos y Minerales. (2021). *Ficha técnica: Carbón vegetal.*

Documento interno proporcionado directamente.

El biochart utilizado como materia prima para la elaboración de pellets presenta propiedades físico-químicas óptimas para aplicaciones en la captura de CO₂. Su alto contenido de carbono y bajo porcentaje de cenizas aseguran un buen desempeño en términos de adsorción y estabilidad mecánica, mientras que la presencia de grupos funcionales oxigenados y nitrógeno contribuyen a la interacción con las moléculas de CO₂. Estas características posicionan al biochart como un material eficiente y sostenible para su uso en sistemas de lecho fijo en procesos industriales.

5.3 Análisis y Cálculos de los Pellets de Biochart

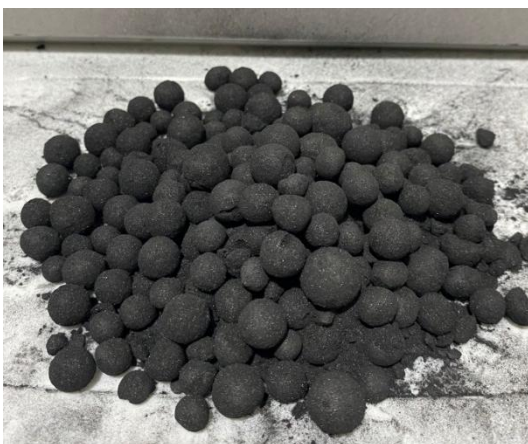
Los pellets de biochart presentados en la

Figura 8 fueron obtenidos mediante un proceso de aglomeración en una peletizadora de disco, empleando agua como aglutinante. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis para evaluar su uniformidad y determinar su estructura porosa, utilizando microscopía óptica mediante un Estereomicroscopio Olympus SZ61. Además, se calcularon la densidad aparente y el diámetro promedio de los pellets. En la **Tabla 3** se presentan los resultados obtenidos en dichos análisis:

Tabla 3.*Análisis pellets de Biochart Obtenidos*

Propiedad	Valor
Densidad aparente [g/cm ³]	0,54
Tamaño promedio [mm]	11,75
Rango de Variación [mm]	10
Uniformidad	Adecuada
Estructura porosa	Homogénea

Nota. En el Apéndice C se encuentran los datos y cálculos realizados para obtener estos resultados.

Figura 8.*Pellets de biochart producidos y fotografía de superficie porosa bajo estereomicroscopio*

Nota. El análisis de la estructura porosa de la superficie de los pellets se realizó mediante un estereomicroscopio Olympus SZ61.

Los resultados presentados en la **Tabla 3** evidencian que los pellets de biochart obtenidos poseen propiedades físicas adecuadas para su implementación en sistemas de lecho fijo. La densidad aparente de 0,54 g/cm³ indica que los pellets tienen una estructura ligera pero lo suficientemente compacta para garantizar estabilidad mecánica y un buen flujo de gases a través del lecho. El tamaño promedio de 11,75 mm y la uniformidad adecuada, junto con un rango de variación de 10 mm, sugieren que, aunque existe cierta dispersión en los diámetros, la distribución es razonablemente homogénea y funcional para aplicaciones industriales. Además, la estructura porosa homogénea, atribuida al uso de una malla No. 100 durante la fase de tamizado en la preparación de los pellets, confirma que estos poseen características óptimas para maximizar la adsorción de CO₂, al proporcionar una superficie activa consistente en todo el material.

5.4 Diseño de la Columna de Adsorción

La **Tabla 4** resume las principales características del diseño de la columna de adsorción presentada en la

Figura 9, destacando los materiales y dimensiones relevantes que garantizan su funcionalidad y adaptabilidad en el sistema experimental.

Tabla 4.

Características de diseño de la columna de adsorción a escala laboratorio.

Propiedad	Valor
Volumen total	500 cm ³

Diámetro interno	7 cm
Altura total	17 cm
Número de boquillas	2 (entrada inferior, salida superior)
Material de la columna	Pyrex (Borosilicato transparente de baja expansión térmica)
Diámetro Interno Boquilla de la tapa	3 cm
Material de la tapa	Polietileno de alta densidad (HDPE)
Método de sellado	Rosca ajustable
Función de la tapa	Carga de pellets y sellado hermético

Figura 9.

Columna de adsorción utilizada en la fase experimental



La columna de adsorción presenta un diseño robusto y funcional, adecuado para aplicaciones experimentales a escala de laboratorio. Su construcción en material Pyrex proporciona resistencia química y térmica, lo que garantiza su durabilidad en condiciones de

operación a altas temperaturas y en presencia de gases potencialmente reactivos. Con un volumen total de **500 cm³**, la columna ofrece una capacidad óptima para albergar un lecho fijo de pellets de biochart, permitiendo evaluar la captura de CO₂ bajo diversas configuraciones.

El diámetro interno de **7 cm** y la altura de **17 cm** proporcionan un equilibrio entre espacio suficiente para el flujo de gases y una estructura compacta que facilita el manejo en el laboratorio. La incorporación de una tapa de polietileno de alta densidad (HDPE) con rosca ajustable asegura un sellado hermético, evitando fugas de gas durante las pruebas, y permite una fácil carga de los pellets. Las dos boquillas (entrada inferior y salida superior) están estratégicamente ubicadas para garantizar un flujo uniforme a través del lecho adsorbente, optimizando la interacción gas-sólido. Este diseño permite la realización de pruebas controladas y repetibles, estableciendo una base sólida para la evaluación de la eficiencia de captura de CO₂ en sistemas de lecho fijo.

5.5 Evaluación de la Eficiencia del Sistema de Adsorción de CO₂

Tras la caracterización de los materiales y el diseño del sistema, se procedió al análisis de eficiencia del sistema de adsorción. Se llevaron a cabo mediciones de la concentración de CO₂ en las pruebas de referencia y experimentales. A continuación, se presenta un análisis detallado de las seis pruebas experimentales realizadas, incluyendo dos pruebas de referencia (sin columna) y cuatro pruebas con la columna de biochart bajo diferentes configuraciones. El análisis incluye las concentraciones de CO₂ a la salida del sistema, las masas de CO₂ producidas y capturadas, y la eficiencia de captura para cada configuración.

5.5.1 Configuración del Sistema Experimental

El diseño experimental presentado en la **Tabla 5** incluye seis configuraciones de pruebas, cuidadosamente seleccionadas para evaluar la eficiencia de captura de CO₂ mediante pellets de biochart en un sistema de lecho fijo. Estas configuraciones se definieron considerando dos variables clave: la temperatura de coquización (450 °C y 600 °C) y la altura del lecho empacado (5 cm y 10 cm). Las pruebas se dividieron en dos series principales: dos pruebas de referencia sin columna para determinar la cantidad base de CO₂ producido, y cuatro pruebas con la columna empacada, en las que se variaron las condiciones de operación.

Tabla 5.

Configuraciones de las pruebas experimentales

# Prueba	Temperatura Coquización [°C]	Altura de Lecho [cm]	Condición Experimental
1	450	-	Referencia (sin columna)
2	600	-	Referencia (sin columna)
3	450	5	Captura (con columna)
4	450	10	Captura (con columna)
5	600	5	Captura (con columna)
6	600	10	Captura (con columna)

La elección de estas configuraciones responde a la necesidad de analizar el impacto de las variables más importantes en el proceso. La temperatura de coquización afecta la cantidad de CO₂ generado debido a los cambios en la descomposición térmica del carbón coquizable, mientras que la altura del lecho empacado influye en el tiempo de contacto entre los gases y el material adsorbente, así como en la capacidad total de adsorción del sistema. Este enfoque permite

identificar las condiciones óptimas para maximizar la captura de CO₂, sentando las bases para aplicaciones industriales más sostenibles y eficientes.

5.5.2 Concentraciones y Cálculos de Masa Producida y Capturada de CO₂

A continuación, se describen las fórmulas empleadas para calcular las masas de CO₂ producido y capturado, así como la eficiencia de captura del sistema.

5.5.2.1 Masa de CO₂ Producido. La masa de CO₂ producido se calcula integrando las concentraciones de CO₂ medidas a la salida del sistema sin la columna de biochart:

$$\text{Masa de CO}_2 \text{ producido (g)} = \sum_{i=1}^n \left(C_i * Q * t * \frac{M}{V} \right) \quad (\text{Ec. 1})$$

C_i: Concentración de CO₂ en el intervalo i [ppm] (Se divide en 10⁶ Para convertirlo en fracción molar y cancelar unidades)

Q: Flujo volumétrico de aire [m³/s]

t: Tiempo del intervalo [s]

M: Masa molar del CO₂ [44 g/mol]

V: Volumen molar del gas a condiciones estándar [0.0224 m³/mol]

Esta fórmula toma en cuenta el flujo continuo del sistema y convierte la concentración de CO₂ medida en masa utilizando propiedades físicas conocidas del gas.

5.5.2.2 Masa de CO₂ Capturado. La masa de CO₂ capturado se calcula de forma similar, pero utilizando las concentraciones de CO₂ medidas a la salida del sistema con la columna de biochart conectada:

$$\text{Masa de CO}_2 \text{ capt (g)} = \text{Masa de CO}_2 \text{ prod (sin columna)} - \text{Masa de CO}_2 \text{ (con columna)} \quad (\text{Ec. 2})$$

Esta diferencia refleja la cantidad de CO₂ adsorbida por los pellets de biochart.

5.5.2.3 Eficiencia de Captura de CO₂. La eficiencia de captura se expresa como un porcentaje que indica la efectividad del sistema de adsorción:

$$\text{Eficiencia}(\%) = \frac{\text{Masa de CO}_2 \text{ capturado}}{\text{Masa de CO}_2 \text{ producido(sin columna)}} * 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Este cálculo proporciona una medida del rendimiento del sistema de lecho fijo y permite comparar configuraciones experimentales con distintas alturas de lecho y temperaturas.

En la **Tabla 6** se presentan las concentraciones promedio de CO₂ registradas a la salida del sistema, junto con los cálculos correspondientes de la masa de CO₂ producido y capturado para cada una de las pruebas realizadas. Además, se incluye la eficiencia de captura obtenida bajo las diferentes configuraciones experimentales.

Tabla 6.

Concentraciones y Masa de CO₂ producido y capturado

# Prueba	Concentración Promedio CO ₂ [ppm]	Masa CO ₂ Producido (sin Columna) [g]	Masa de CO ₂ Producido (con Columna) [g]	Eficiencia Captura [%]
1	2648,89	0,7909	-	-
2	3798,58	1,1341	-	-
3	1335,68	0,7909	0,3988	49,58

4	1174,74	0,7909	0,3507	55,65
5	2411,42	1,1341	0,7200	36,52
6	2295,21	1,1341	0,6853	39,58

La **Tabla 6** presenta un resumen de los resultados obtenidos en las seis pruebas experimentales realizadas, destacando las concentraciones promedio de CO₂, las masas calculadas de CO₂ producido y capturado, y la eficiencia de captura del sistema bajo distintas condiciones. A continuación, se analizan los resultados en detalle.

5.5.3 Pruebas de Referencia (Pruebas 1 y 2)

Las pruebas de referencia se realizaron sin la columna de biochart para determinar la cantidad base de CO₂ generado en el sistema.

En la Prueba 1, realizada a 450 °C, se obtuvo una concentración promedio de 2648,89 ppm, que corresponde a una masa de 0,7909 g de CO₂ producido. En la Prueba 2, realizada a 600 °C, la concentración promedio aumentó a 3798,58 ppm, generando una masa de 1,1341 g de CO₂. Este incremento de CO₂ producido a mayor temperatura se debe al aumento en la descomposición térmica del carbón coquizable, lo que refleja una relación directa entre la temperatura de coquización y la generación de gases.

5.5.4 Pruebas con la Columna de Biochart (Pruebas 3 a 6)

La incorporación de la columna de biochart redujo significativamente la concentración de CO₂ a la salida del sistema, indicando la eficacia del material adsorbente.

5.5.4.1 Pruebas a 450 °C (Pruebas 3 y 4). En la Prueba 3 (altura de lecho de 5 cm), la concentración promedio de CO₂ fue de 1335,68 ppm, resultando en una masa capturada de 0,3988 g y una eficiencia del 49,58 %. En la Prueba 4 (altura de lecho de 10 cm), la concentración promedio disminuyó aún más a 1174,74 ppm, logrando capturar 0,3507 g de CO₂ con una eficiencia mayor del 55,65 %. Este incremento en la eficiencia con el aumento de la altura del lecho puede atribuirse al mayor tiempo de contacto entre los gases y el biochart, así como al aumento de la cantidad de material adsorbente.

5.5.4.2 Pruebas a 600 °C (Pruebas 5 y 6). En la Prueba 5 (altura de lecho de 5 cm), la concentración promedio fue de 2411,42 ppm, logrando capturar 0,7200 g de CO₂ con una eficiencia del 36,52 %. En la Prueba 6 (altura de lecho de 10 cm), la concentración promedio disminuyó a 2295,21 ppm, capturando 0,6853 g de CO₂ con una eficiencia del 39,58 %. Aunque la eficiencia de captura es menor a mayor temperatura en estas pruebas, esto podría explicarse por la saturación del material adsorbente debido a la mayor cantidad de CO₂ producido a 600 °C.

5.5.5 Comparación General

Las pruebas a 450 °C mostraron mejores eficiencias de captura (49,58 % y 55,65 %) en comparación con las pruebas a 600 °C (36,52 % y 39,58 %). El aumento de la altura del lecho mejora consistentemente la eficiencia, debido a que incrementa la capacidad total de adsorción y el tiempo de contacto entre el gas y el material adsorbente. Sin embargo, la eficiencia general disminuye a temperaturas más altas, probablemente debido a la mayor cantidad de CO₂ generado y la saturación más rápida del lecho empacado.

5.5.5.1 Efecto de la Temperatura. A mayor temperatura de coquización, la cantidad de CO₂ producido aumenta significativamente, lo que puede dificultar la captura debido a la saturación del biochart.

5.5.5.2 Efecto de la Altura del Lecho. La altura del lecho es un factor crítico para mejorar la eficiencia de captura, ya que incrementa tanto el tiempo de contacto como la capacidad de adsorción.

5.5.5.3 Rendimiento del Sistema. Las mejores condiciones de captura se lograron en la Prueba 4 (450 °C y 10 cm de altura de lecho), con una eficiencia del 55,65 %, lo que indica que esta configuración es la más adecuada dentro del rango de estudio.

Este análisis refleja la importancia de optimizar las condiciones de operación para maximizar la eficiencia de captura de CO₂ y resalta el potencial del biochart como un material adsorbente eficaz en aplicaciones de captura de carbono.

6. Conclusiones

La caracterización del carbón coquizable y del biochart permitió obtener información sobre sus propiedades físicas y químicas, lo que proporciona un punto de partida para su posible implementación en sistemas de captura de CO₂. En particular, el biochart, con un contenido de carbono del 87,90 % y un bajo porcentaje de cenizas (1,00-3,50 %), mostró características que podrían favorecer la adsorción de CO₂. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para comprender mejor su desempeño en aplicaciones a mayor escala.

El uso de pellets de biochart en un sistema de lecho fijo mostró resultados que sugieren una reducción en la concentración de CO₂ en las emisiones generadas durante la coquización de

carbones. Las pruebas realizadas a 450 °C y con una altura de lecho de 10 cm presentaron la mayor eficiencia de captura registrada en este estudio (55,65 %), lo que indicaría que una mayor altura del lecho podría influir positivamente en el tiempo de contacto gas-sólido y en la capacidad total de adsorción. No obstante, debido a la alta concentración de CO₂ liberada en el proceso de coquización, es posible que la adsorción no sea la alternativa más adecuada a gran escala en comparación con otros métodos, como la absorción, por lo que se recomienda evaluar diferentes enfoques en estudios futuros.

Las configuraciones experimentales permitieron analizar la influencia de la temperatura de coquización y la altura del lecho en el rendimiento del sistema. Se observó que a temperaturas más altas (600 °C), aunque la cantidad de CO₂ generado fue mayor, la eficiencia de captura disminuyó, posiblemente debido a la saturación del material adsorbente. Esto sugiere que puede existir una relación entre la temperatura operativa y la capacidad de captura de CO₂ del sistema, la cual requiere un análisis más detallado en estudios posteriores.

Los resultados obtenidos en este trabajo representan un primer acercamiento al estudio de la captura de CO₂ con biochart en procesos de coquización. Aunque los hallazgos sugieren que este material podría desempeñar un papel en estrategias de mitigación de emisiones, aún es necesario ampliar la investigación para evaluar su viabilidad en escenarios industriales.

Finalmente, la aplicación del biochart en la captura de CO₂ podría alinearse con iniciativas de sostenibilidad y economía circular, al emplear residuos de biomasa como materia prima. Sin embargo, para comprender mejor su impacto a largo plazo, es necesario realizar estudios complementarios que permitan establecer su efectividad en condiciones operativas más representativas de la industria.

7. Recomendaciones

Se recomienda continuar evaluando diferentes configuraciones de lecho fijo, considerando variaciones en la densidad y tamaño de los pellets, con el fin de analizar su efecto en la interacción gas-sólido y su posible influencia en la captura de CO₂. Esto permitiría establecer condiciones más favorables para futuras aplicaciones del sistema.

Es necesario realizar estudios adicionales que permitan evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema en escenarios más representativos de la industria. Para ello, se sugiere considerar aspectos como los costos de producción del biochart, las condiciones de operación y las limitaciones físicas del diseño experimental, con el fin de determinar su potencial aplicación a mayor escala.

Explorar el impacto de variables como el flujo de aire, la humedad y la composición del gas de entrada podría proporcionar una mejor comprensión sobre las condiciones óptimas de operación del sistema y su influencia en la eficiencia de captura de CO₂. Estudios complementarios permitirían establecer el alcance real de esta tecnología en diferentes entornos industriales.

Se recomienda llevar a cabo pruebas prolongadas para analizar la estabilidad y capacidad regenerativa del biochart después de varios ciclos de adsorción, con el propósito de determinar su eficiencia sostenida en aplicaciones de largo plazo y evaluar su posible reutilización en procesos continuos.

Considerando el enfoque de economía circular, se sugiere explorar posibles aplicaciones del biochart saturado de CO₂ en otros procesos industriales, tales como la producción de combustibles sólidos, la reducción de metales o la mejora de suelos agrícolas. Esto permitiría

maximizar su aprovechamiento y reducir la generación de residuos, contribuyendo a un modelo más sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Biochar Today*. (2024). Optimizing CO₂ adsorption using KOH-activated biochar and machine learning. Recuperado de <https://biochartoday.com/2024/10/03/optimizing-co2-adsorption-using-koh-activated-biochar-and-machine-learning/>
- British Steel News*. (2024). British Steel supports study into environmentally friendly green fuel. Recuperado de <https://britishsteel.co.uk/news/british-steel-supports-study-into-environmentally-friendly-green-fuel/>
- Ecología Verde. (2019). *El impacto medioambiental del dióxido de carbono*. Recuperado de <https://www.ecologiaverde.com/el-impacto-medioambiental-del-dioxido-de-carbono-1334.html>
- Garzón Green Energy. (n.d.). *Qué es el biochar y para qué sirve*. Recuperado de <https://garzongreenenergy.es/blog/que-es-el-biochar-y-para-que-sirve-2/>
- Ibitoye, S.E., Loha, C., Mahamood, R.M. *et al.* An overview of biochar production techniques and application in iron and steel industries. *Bioresour. Bioprocess.* **11**, 65 (2024). Recuperado de <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00779-z>
- Industria Química. (2024). *Biochar: Un material emergente para la mejora del tratamiento biológico de residuos orgánicos*. Recuperado de <https://www.industriaquimica.es/articulos/20240604/biochar-un-material-emergente-mejora-tratamiento-biologico-residuos-organicos>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2009). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan.

Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (Eds.). (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press.
<https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>

Nomura, S., Arima, T., & Matsui, H. (2004). CO₂ Emission Reduction in the Iron and Steel Industry. JFE Technical Report, 3, 1-6. <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/003/pdf/003-01.pdf>

Riahi, A., & LaDouceur, R. (2024). Optimizing the physical properties of biochar for CO₂ adsorption using resonant vibrations. Recuperado de https://digitalcommons.mtech.edu/mine_engr/17/

Ricketts, J. (2013). *The Making, Shaping and Treating of Steel: Ironmaking Volume*. AISE Steel Foundation.

Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2013). *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*. Academic Press.

SBS Process. (2024). *Descubre el biochar: La solución sostenible que está revolucionando la agricultura, el medioambiente y la industria*. Recuperado de <https://sbsprocess.com/descubre-el-biochar-la-solucion-sostenible-que-esta-revolucionando-la-agricultura-el-medioambiente-y-la-industria>

Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquérol, J., & Siemieniewska, T. (2001). *Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with*

Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. Pure and Applied Chemistry, 57(4), 603–619.

Speight, J. G. (2013). *The Chemistry and Technology of Coal* (3rd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b14872>

Steel Technology. (2024). Tata Steel becomes the first Indian steel maker to introduce biochar to lower carbon emissions. Recuperado de <https://www.steel-technology.com/pressreleases/tata-steel-becomes-the-first-indian-steel-maker-to-introduce>

UNAM Global. (2024). *El impacto de las emisiones de CO₂ en nuestro planeta y cómo podemos contribuir*. Recuperado de https://unamglobal.unam.mx/global_revista/el-impacto-de-las-emisiones-de-co2-en-nuestro-planeta-y-como-podemos-contribuir

Yang, R. T. (1987). *Gas Separation by Adsorption Processes*. Butterworth-Heinemann.

Apéndices

Apéndice A.

Definiciones, ecuaciones y procedimientos utilizados para la caracterización del carbón.

Caracterización del Carbón

Se refiere al proceso de analizar y determinar las propiedades físicas, químicas y estructurales del carbón. Este análisis es crucial para comprender su comportamiento en distintos procesos industriales, como la combustión, la gasificación o la fabricación de carbón activado, así como para evaluar su calidad y aplicabilidad en diversas industrias.

Humedad

La humedad de un material, como el carbón, se refiere a la cantidad de agua presente en él, tanto en forma libre como ligada químicamente. Se expresa generalmente como un porcentaje del peso total del material. La humedad influye en las propiedades del carbón, como su poder calorífico y su capacidad para ser almacenado o transportado, ya que un mayor contenido de agua puede reducir su eficiencia en procesos como la combustión.

$$\%Humedad = \left(\frac{A - B}{A} \right) * 100 \quad (1)$$

A = Gramos de la muestra usada

B = Gramos de la muestra después de calentamiento.

Cenizas

La ceniza es el residuo inorgánico que queda después de la combustión de un material, como el carbón. Está compuesta principalmente por minerales, como sílice, alúmina, cal,

óxidos metálicos y otros compuestos no combustibles. El contenido de ceniza es un factor importante en la caracterización del carbón, ya que influye en su poder calorífico y en los posibles efectos negativos durante la combustión, como la corrosión de equipos o la generación de residuos contaminantes.

$$\%ceniza = \left(\frac{P3 - P1}{P2 - P1} \right) * 100 \quad (2)$$

P1 = Peso del crisol vacío con tapa (gr)

P2 = Peso del crisol y carbón antes del secado (gr)

P3 = Peso del crisol y carbón después del secado (gr)

Material Volátil

El material volátil en el carbón se refiere a los compuestos orgánicos que se liberan como gases durante el proceso de calentamiento o combustión a temperaturas elevadas. Estos compuestos incluyen principalmente agua, gases como dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos, así como impurezas como azufre y nitrógeno. El contenido de materiales volátiles es un indicador de la calidad del carbón, ya que influye en su combustibilidad, poder calorífico y comportamiento durante la quema.

$$\%Material\ volátil = \left(\frac{B - C}{B - A} \right) * 100 \quad (3)$$

A = Masa del crisol con tapa

B = Masa del crisol con tapa y carbón antes del calentamiento.

C = Masa del crisol con tapa y carbón después del calentamiento.

Poder Calorífico

El poder calorífico del carbón se refiere a la cantidad de energía que puede liberar al quemarse completamente. Un mayor poder calorífico significa que el carbón puede generar más calor por unidad de peso, lo que lo hace más eficiente en aplicaciones industriales y energéticas.

$$Q = \frac{\Delta T * C - (e1 + e2 + e3)}{m} \quad (4)$$

Donde:

Q= Poder calorífico, BTU/lb

Delta T= Incremento de temperatura, Tc-Ta

C= Capacidad Térmica del calorímetro BTU/lb*gr/°C 5088.366

m= Peso de la muestra.

e1= 0

e2= Calor de combustión del alambre fusible Ni-Cr = 0.41*alambre quemado, mm
(BTU/lb)*gr

e3= Calor de formación del ácido sulfúrico. = 10.0*ml de Na2CO3 (0.394 N) usados
(BTU/lb)*gr

Carbón Fijo

Es la porción combustible que queda después de la remoción de la humedad, ceniza y materia volátil, y aunque está constituida principalmente de carbono, incluye también hidrogeno, azufre, oxígeno y nitrógeno.

$$C_f = 100 - (\%ceniza + \%humedad + \%material\ volatil) \quad (5)$$

Apéndice B.*Ficha Técnica: Carbón Vegetal*

FICHA TÉCNICA Carbón Vegetal

FORMATO : BIO - FR - 001			Referencia:	16070 - 16072
Versión:	001		Categoría:	Mineral
Fecha:	01/01/2021		Presentación:	Paquete 1 Kg Bulto 10 kg Bulto 20 kg
			Textura:	Sólido, frágil y poroso

DESCRIPCIÓN

Material combustible sólido de color negruzco, frágil y de composición porosa con un alto contenido en carbono. Se produce por calentamiento en ausencia de aire, de madera y residuos vegetales, elaborado artesanalmente, lo que hace que en ocasiones la granulometría oscile.

Este tipo de carbón tiene la propiedad única de absorber (es decir, retener en su superficie) o remover gases venenosos, drogas, químicos, tóxicos, bacterias y virus.

PROPIEDADES

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS		COMPOSICIÓN	
Color:	Negro	Carbono:	87,9 %
Olor:	Olor residual a humo	Hidrógeno:	2,83 %
Granulometría:	15 – 100 mm	Nitrógeno:	0,31 %
Densidad:	1500 kg/m3	Azufre:	<0,13%
Cenizas:	1,00 % – 3,50 %	Oxígeno:	7,69 %
Material volátil:	11 % - 25 %		




USOS

- En la agricultura, su uso como fertilizante ayuda a mejorar significativamente la calidad de los suelos, su estructura, la saturación de nutrientes y, en consecuencia, aumenta la productividad de los cultivos.
- En medicina, el carbón vegetal se usa para casos de envenenamiento, ya que desintoxica rápidamente el organismo. De igual forma, en caso de heridas infectadas.



¡Un Universo en Sustratos!

Teléfonos: 3193233980 – 3197321288 - 5359083
 Dirección: Carrera 110 B # 136 A-58, Bogotá, Col
 Correo: comercial@bioespacio.co
 Página Web: www.bioespacio.co

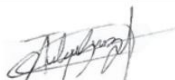


Síguenos:
 @bio3spacio
 @bio3spacio
 #bio3spacio

BENEFICIOS

- Es químicamente inerte y por lo tanto puede estar acostado en la tierra milenios, sin descomponerse ni generando peligros serios a la salud.
- Tiene una alta absorción, es decir, puede absorber el exceso de, por ejemplo, óxidos de aluminio, que hay muchos en suelos tropicales y que inhiben el crecimiento del sistema de raíz de las plantas.
- Posee una gran porosidad.
- El carbón vegetal en el suelo tiene la propiedad singular de retener el nitrógeno del aire y convertirse en la forma accesible para las plantas.
- Este mineral en el suelo funciona como un catalizador de la actividad vital de la biosfera de la capa del humus.
- En los períodos lluviosos, el carbón colocado en el suelo absorbe activamente la humedad y durante una sequía la devuelve como un regulador de la humedad del suelo. La presencia de carbón en el suelo entre otras cosas inhibe el desarrollo de los insectos y plagas.
- Posee propiedades medicinales.

PRECAUCIONES

- **USO DE TAPABOCAS:** Durante su uso se recomienda el uso de tapa bocas para evitar problemas respiratorios generados por pequeñas partículas de este material y durante tiempos prolongados.
- **USO DE GAFAS INDUSTRIALES:** Puede ocasionar lesiones a la vista al ser manipulado durante largos periodos. Para dado caso se recomienda lavar la parte afectada con abundante agua.
- Manténgase en un lugar fresco.
- Manténgase fuera del alcance de los niños.

Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:
		
Ing. Andrés Suárez	Ing. Juan Paez	Blog. Jose López



¡Un Universo en Sustratos!

Teléfonos: 3193233980 – 3197321288 - 5359083
 Dirección: Carrera 110 B # 136 A-58, Bogotá, Col
 Correo: comercial@bioespacio.co
 Página Web: www.bioespacio.co



Síguenos:
 @bio3spacio
 #bio3spacio

Bio

Apéndice C.*Cálculo propiedades físicas de los pellets*

Diámetro Promedio

$$D_1 = 11 \text{ mm}$$

$$D_2 = 13 \text{ mm}$$

$$D_3 = 17 \text{ mm}$$

$$D_4 = 15 \text{ mm}$$

$$D_5 = 10 \text{ mm}$$

$$D_6 = 12 \text{ mm}$$

$$D_7 = 14 \text{ mm}$$

$$D_8 = 10 \text{ mm}$$

$$D_9 = 10 \text{ mm}$$

$$D_{10} = 9 \text{ mm}$$

$$D_{11} = 14 \text{ mm}$$

$$D_{12} = 8 \text{ mm}$$

$$D_{13} = 11 \text{ mm}$$

$$D_{14} = 11 \text{ mm}$$

$$D_{15} = 13 \text{ mm}$$

$$D_{16} = 9 \text{ mm}$$

$$D_{17} = 11 \text{ mm}$$

$$D_{18} = 15 \text{ mm}$$

$$D_{19} = 14 \text{ mm}$$

$$D_{20} = 7 \text{ mm}$$

$$\mathbf{Diametro}_{prom} = \frac{\Sigma D}{\#Total D}$$

$$\mathbf{Diametro}_{prom} = 11.75 \text{ mm}$$

Rango de variación

$$Rango = D_{max} - D_{min} = 17\text{mm} - 7\text{mm} = 10\text{mm}$$

Densidad Aparente

$$\mathbf{Densidad\ aparente}(\rho_a) = \frac{\mathbf{Masa\ de\ los\ pellets\ (g)}}{\mathbf{Volumen\ Ocupado\ (cm^3)}}$$

$$\mathbf{Densidad\ aparente}(\rho_a) = \frac{209 \text{ (g)}}{384,84 \text{ (cm}^3\text{)}}$$

$$\mathbf{Densidad\ aparente}(\rho_a) = 0.54 \frac{\mathbf{g}}{\mathbf{cm}^3}$$

Apéndice D.

Fotografías de equipos empleados y montaje.



Medidor de Calidad de Aire



Especificaciones Medidor de Calidad de Aire



Bomba de Aire

技术参数 Technical parameters	
型号 Model	AP-1688
功率 Power	1.5W
排气量 Max Output	1.6L/min
气压 Pressure	0.01Mpa
重量 Weight	0.15Kg
产品尺寸 Size	97x55x48mm

Parametros Tecnicos Bomba de Aire



Triturador de Mandíbula



Tamizaje



Balanza Analítica para Muestra de Carbón



Mufla



Cámara Calorimétrica



Muestras de Carbón



Pelletización de Biochart



Montaje Experimental General

Apéndice E.*Datos Experimentales*

RECOPIACIÓN DATOS EXPERIMENTALES						
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Tiempo [min]	Concentración CO2 [ppm]	Concentración CO2 [ppm]	Concentración CO2 [ppm]	Concentración CO2 [ppm]	Concentración CO2 [ppm]	Concentración CO2 [ppm]
0	873	1263	445	444	617	550
5	1533	3271	510	620	2423	3056
10	3258	3507	521	960	3584	2089
15	2530	3219	521	548	3367	3128
20	2148	3987	532	631	2402	4701
25	1916	3728	2897	2131	2644	4623
30	2467	4294	821	1759	3187	2884
35	2100	4027	1093	1762	2721	2268
40	2240	3901	1397	587	3007	4207
45	3192	3976	3468	921	2734	3986
50	2802	4184	3752	2169	2603	2301
55	3812	4426	873	2102	2972	851
60	3182	3926	825	532	3143	2704
65	3907	4207	1945	510	3073	1749
70	3140	4851	750	2875	2292	1056
75	2623	3500	1212	1099	1421	950
80	1673	3823	988	1357	1171	620
85	3964	3778	1655	770	1319	923
90	2969	4305	1173	543	1137	963
Promedio Concentración CO2 [ppm]	2648,89	3798,58	1335,68	1174,74	2411,42	2295,21